

上海工业大学
上海直流电机厂 编

直流电机设计

机械工业出版社

本书在总结我国直流电机设计经验的基础上，紧密结合生产实践，吸收国内外的先进经验，并采用了电子计算机设计程序，有其独到之处。

本书在论述了直流电机的结构、原理、运行特性、换向以及损耗和效率之后，又阐述了电磁设计、结构设计和机械计算，书中还附有电磁设计例题和设计程序。

本书可供高等院校电机专业师生及电机研究单位和工厂的技术人员参考。

直流电机设计

上海工业大学
上海直流电机厂 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 12 1/4·字数 266 千字
1983 年 2 月北京第一版·1983 年 7 月北京第一次印刷
印数 00,001-11,000·定价 1.50 元

*

统一书号：15033·5364

前　　言

直流电机是工业上广泛应用的一种电机。尤其是直流电动机，因它的特性易于控制，适合于自动化的需要，是当前量大面广的产品之一。

近年来，电子计算机的应用有力地推动了科学技术的发展，利用电子计算机进行直流电机的设计，已成为广大学生和工程技术人员的迫切要求。这对直流电机的设计提出了新的任务。

为了使直流电机的设计密切结合我国的生产实践，为了使直流电机的设计逐步应用电子计算机，上海工业大学电机系和上海直流电机厂共同编写这本«直流电机设计»。该书曾先后修改过三次，在一些高等学校和工厂试用过，反映较好。现经整理后出版，可供高等学校电机专业的师生及电机研究单位和工厂的技术人员参考。

本书的最后一稿，第一章由许亚甲副教授改写，第二、三、四章由胡之光副教授改写，第五、十一章由江建中同志改写，第六、七、八章由张熙詠同志改写，第九章由屠关镇同志改写，第十章及附录由汪信尧同志改写，最后经许亚甲、胡之光两同志修改定稿。书中的名词、符号和单位，与上海直流电机厂主编的«电机工程手册直流电机篇»相一致，书中的大部分数据和插图亦取材于这本手册。

本书曾请上海交通大学程福秀教授、哈尔滨大电机研究所叶自仪工程师、上海电机厂黄国璋副总工程师、上海电机技术研究所樊虎所长、福州大学卓忠疆教授、西安交通大学陈

世坤副教授、上海直流电机厂崔朝宗工程师和东方电机厂陈汉德工程师等进行审稿，得到不少指导和帮助。在此，一并致以深切的谢意。

本书的初稿虽经一定的教学实践，并曾进行过多次修改，但由于编者水平所限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编　者

主要符号表

A——电负荷

$A_{Cu\,a}$——电枢导体截面积

$A_{Cu\,f}(A_{Al\,f})$——并励绕组铜(铝)导体截面积

$A_{Cu\,K}(A_{Al\,K})$——换向极绕组铜(铝)导体截面积

$A_{Cu\,s}(A_{Al\,s})$——串励绕组铜(铝)导体截面积

A_j——机座轭截面积

A_{ja}——电枢轭截面积

A_m——主磁极铁心截面积

A_{mK}——换向极铁心截面积

A_s——槽的有效面积

A_{ta}——电枢齿截面积

A_δ——气隙截面积

a——并联支路对数

B_j——机座轭磁通密度

B_{ja}——电枢轭磁通密度

B_m——主磁极磁通密度

B_{ta}——电枢齿磁通密度

$B_{ta1/2}$——电枢1/2齿高处磁通密度

$B_{ta1/3}$——电枢1/3齿高处磁通密度

B_δ——气隙磁通密度

$B_{\delta K}$——换向极气隙磁通密度

b_b——电刷宽度

b_K——换向区域宽度

b_m——主磁极极身宽度

b_{mK}——换向极极身宽度

b_n——中性区域宽度

b_0——槽口宽度

b_p——主磁极极弧长度

b'_p——主磁极极弧计算长度

b_{pK}——换向极极靴宽度

b_s——槽宽

b_t——齿宽

$b_{ta1/2}$——电枢1/2齿高处齿宽

$b_{ta1/3}$——电枢1/3齿高处齿宽

b_{ta3}——电枢齿根宽

b_{Wf}——并励线圈宽度

b_{WK}——换向极线圈宽度

b_{Ws}——串励线圈宽度

D_a——电枢外径

D_{ia}——电枢内径

D_{ij}——机座内径

D_j——机座外径

D_K——换向器外径

d——绝缘导体直径

d_c——裸导线直径

d_v——通风孔直径

E_a——电枢绕组感应电动势

E_N——额定电动势
E_0——空载电动势
e_r——电抗电动势
e_s——旋转电动势
F_{aq}——交轴电枢反应磁动势
F_{aqd}——交轴电枢反应去磁磁动势
F_f——并励绕组磁动势
F_j——机座轭磁动势
F_{ja}——电枢轭磁动势
F_K——换向极绕组磁动势
F_m——主磁极磁动势
F_N——额定总磁动势
F_s——串励绕组磁动势
F_{ta}——电枢齿磁动势
F_δ——气隙磁动势
ΣF——每极磁动势
f——频率
$G_{Cu\,a}$——电枢绕组铜重
$G_{Cu\,f}$, $(G_{Al\,f})$——并励绕组铜(铝)重
$G_{Cu\,K}$, $(G_{Al\,K})$——换向极绕组铜(铝)重
$G_{Cu\,s}(G_{Al\,s})$——串励绕组铜(铝)重
$G_{Fe\,j}$——电枢轭铁重
$G_{Fe\,t}$——电枢齿铁重
H_j——机座轭磁场强度
H_{ja}——电枢轭磁场强度
H_m——主磁极磁场强度
H_{ta}——电枢齿磁场强度
$H_{ta^1/_3}$——电枢 1/3 齿高处的磁场强度
h_b——电刷高度
h_j——机座轭高度
h_{ja}——电枢轭高度
h'_{ja}——电枢轭计算高度
h_m——主磁极高度
h_{mK}——换向极高度
h_0——槽口高
h_s——槽高
h_{Wf}——并励绕组高度
h_{WK}——换向极绕组高度
h_{Ws}——串励绕组高度
I_a——电枢电流
$I_{f\,max}$——最大并励电流
I_{fN}——额定并励电流
I_N——额定电流
I_0——空载电流
i_a——电枢支路电流
J_a——电枢绕组电流密度
J_b——电刷电流密度
J_f——并励绕组电流密度
J_K——换向极绕组电流密度
J_s——串励绕组电流密度
K——换向器片数
k_E——电枢电路压降系数

k_f——励磁余量
$k_{Fe\,a}$——电枢铁心压装系数
$k_{Fe\,m}$——主磁极铁心压装系数
k_{ja}——电枢轭铁耗增大系数
k_{sf}——槽满率
k_t——齿宽校正系数
k_{ta}——齿部铁耗增大系数
k_β——互感短距系数
k_δ——主磁极气隙系数
$k_{\delta K}$——换向极气隙系数
L_j——机座轭磁路长度
L_{ja}——电枢轭磁路长度
L_m——主磁极磁路长度
L_{ta}——电枢齿磁路长度
l_a——电枢长度
l_{aav}——电枢绕组平均半匝长度
l_b——电刷长度
l_E——电枢绕组端部长度
l_{fav}——并励绕组平均半匝长度
l_j——机座长度
l_K——换向器长度
l_m——主磁极长度
l_{mK}——换向极极身长度
l_{pK}——换向极极靴长度
l_{sav}——串励绕组平均半匝长度
l_{Kav}——换向极绕组平均半匝长度
l_δ——电枢计算长度
m——复倍系数
N_a——电枢总导体数
N_b——每电刷杆的电刷数
N_s——每槽导体数
N_v——轴向通风孔个数
N_{vr}——径向通风沟个数
n_N——额定转速
n_0——空载转速
Δn——转速变化率
P_{ad}——附加损耗
P_{Cua}——电枢绕组铜耗
$P_{Cu\,f}(P_{Al\,f})$——并励绕组铜(铝)耗
$P_{CuK}(P_{Al\,K})$——换向极绕组铜(铝)耗
$P_{Cu\,s}(P_{Al\,s})$——串励绕组铜(铝)耗
P_{em}——电磁功率
P_{fb}——电刷摩擦损耗
P_{fbr}——轴承摩擦损耗
$P_{Fe\,ja}$——电枢轭铁耗
$P_{Fe\,ta}$——电枢齿铁耗
P_{fv}——风阻损耗
P_{fw}——机械损耗
P_N——额定功率
P_1——输入功率
P_2——输出功率
ΣP——总损耗
p——主磁极对数
p_K——换向极极对数
$R_{a\,75°C}$——电枢绕组 75°C 时的电阻
$R_{f\,75°C}$——并励绕组 75°C 时的电阻

$R_{K75°C}$——换向极绕组 75°C 时的电阻
$R_{s75°C}$——串励绕组 75°C 时的电阻
S——电枢元件数
T——转矩
T_K——换向周期
t_a——齿顶处的齿距
$t_{a1/3}$——1/3 齿高处的齿距
t_K——换向器片距
U_{Kav}——换向器片间平均电压
$U_{K\max}$——换向器片间最大电压
U_N——额定电压
U_0——空载电压
ΔU——电压变化率
ΔU_b——正负极的电刷总压降
u——每槽的虚槽数
v_a——电枢周速
v_K——换向器周速
W_a——电枢每元件匝数
W_{aqd}——抵消电枢反应去磁磁动势所需的匝数
W_f——并励绕组匝数
W_K——换向极绕组匝数
W_s——串励绕组匝数
y——合成节距
y_{eqK}——均压线节距
y_K——电枢绕组换向器节距
y_s——槽节距
y_1——电枢绕组第一节距
y_2——电枢绕组第二节距
Z——槽数
α——松散系数
α_p——实际极弧系数
α_p'——计算极弧系数
β——电刷覆盖系数
β_i——换向器片间云母厚度
β_j——电刷覆盖系数的计算值
β_K——换向片厚度
δ——主磁极气隙
δ_i——槽绝缘一侧厚度
δ_K——换向极气隙
θ——温升
ε_s——线圈节距缩短槽数
ε_K——线圈节距缩短虚槽数
η——效率
λ——电枢长度与直径的比值
λ_E——端部漏磁导系数
λ_K——换向极漏导系数
λ_s——槽漏磁导系数
λ_t——齿顶漏磁导系数
ξ——平均漏磁导系数
σ_K——换向极漏磁系数
σ——主磁极漏磁系数
τ——极距
Φ——每极主磁通
Φ_N——每极额定主磁通
Φ_0——空载磁通
Φ_t——一个齿距内的气隙磁通
Φ_σ——漏磁通

目　　录

主要符号表
第一章　概论……1
1-1　直流电机的特点和用途……2
1-2　直流电机的结构……4
1-3　直流电机的主要系列……19
1-4　额定值与技术要求……20
1-5　设计的任务……25
第二章　主要尺寸的决定……27
2-1　主要尺寸与电磁负荷的关系……27
2-2　主要尺寸的选择……32
2-3　极数的选择……42
第三章　电枢设计……45
3-1　电枢绕组的型式及其选择……45
3-2　电枢绕组的设计……58
3-3　电枢绕组的绝缘……66
3-4　电枢冲片尺寸……75
3-5　换向器和电刷……83
第四章　换向……87
4-1　概述……87
4-2　换向元件中的电动势和电流……89
4-3　电抗电动势的计算……92
4-4　换向元件旋转电动势的计算……106
4-5　换向区域宽度与换向极……110
4-6　补偿绕组……116
4-7　换向极绕组……119

第五章　磁路 ……125
5-1　概述 ……125
5-2　气隙选择及其磁动势 ……126
5-3　电枢齿磁动势 ……135
5-4　电枢轭磁动势 ……141
5-5　主磁极磁动势 ……143
5-6　机座轭磁动势 ……146
5-7　空载特性与电枢反应去磁磁动势的计算 ……147
5-8　串励绕组和并(他)励绕组的计算 ……152
第六章　损耗与效率 ……159
6-1　电损耗 ……159
6-2　铁心损耗 ……161
6-3　机械损耗 ……168
6-4　附加损耗 ……171
6-5　总损耗与效率 ……172
第七章　运行特性计算 ……173
7-1　电动机的运行特性及转速变化率 ……173
7-2　发电机的运行特性及电压变化率 ……178
7-3　电枢电路电感的计算 ……181
第八章　电磁设计例题 ……184
8-1　例题 1-电动机 ……184
8-2　例题 2-发电机 ……206
第九章　用电子计算机进行电磁计算 ……233
9-1　程序的一般介绍 ……233
9-2　编制程序的一些处理方法 ……238
9-3　小型直流电机的电磁计算程序 ……248
第十章　通风与散热 ……287
10-1　概述 ……287
10-2　直流电机的通风系统 ……290

10-3 通风计算 ……………………………………………296
10-4 风扇 ……………………………………………301
10-5 改善通风散热的措施 ……………………………………………305
10-6 从试制电机的试验数据估计电机温升 ……………………………………………307
第十一章 结构设计和机械计算 ……………………………………………308
11-1 结构设计 ……………………………………………308
11-2 转轴计算 ……………………………………………310
11-3 扎带计算 ……………………………………………322
11-4 主磁极固紧螺钉的计算 ……………………………………………323
11-5 换向器的计算 ……………………………………………326
11-6 轴承使用寿命的计算 ……………………………………………333
附录 I 常用电磁线及裸扁线表……………………………………………336
附录 II 电工用钢磁化曲线表……………………………………………346
附录 III 电刷技术性能及工作条件……………………………………………349
附录 IV Z2 系列一般用途小型直流电动机电磁设计数据(220 伏、1500 转/分) ……………………………………………350
附录 V Z3 系列一般用途小型直流电动机电磁设计数据(220 伏、1500 转/分) ……………………………………………362
附录 VI 中型直流电机电磁设计数据……………………………………………374

第一章　概　论

直流电机是旋转电机的一种，当作为电动机运行时，由直流电源供电，驱动机械负载旋转；当作为发电机运行时，由原动机驱动，供电给各种需用直流的用电装置。微型直流电机常作为自动控制装置中的控制元件，进行机、电信号的转换。

直流发电机主要作为工业部门所需要的直流电源，曾得到长期和普遍的应用。近年来，随着电子工业的发展，用可控硅整流电源来代替直流发电机已日益广泛。可控硅整流电源的主要优点是体积小、重量轻、维护少、效率高、动作速度快、调压范围宽和控制精度高等，但是它也存在缺点，如输出的电压、电流中含有脉动分量，过载能力低，抗干扰能力差等。当直流电动机采用可控硅供电时，电流中的脉动分量会导致电动机过热和换向困难，不过，可以采取某些措施，促使可控硅整流电路和直流电动机在设计和使用上相互配合，这些问题是可以克服的。直流发电机虽然已被可控硅整流电源逐步取代，但是在无交流输电网络供电而需要直流电源以及如真空冶炼等特殊需要直流供电的场合，直流发电机仍然是必需的。

直流电动机是拖动生产机械的一种动力设备，与交流电动机相比较，它具有良好的起动性能和调速性能，因此获得广泛的应用，并且在不断发展。

解放以来，我国直流电机制造工业有了很大的发展。对于小型电机，在五十年代就有了全国统一的系列，并且不断在改进。如国内正在大量生产的 Z2 系列，功率范围为 0.4～200 千瓦，它是在原来的 Z 系列基础上采用 E、B 级绝缘材料

改型而成的，比 Z 系列节约了铜铁原材料，缩小了体积。目前又在 Z2 系列的基础上改型成 Z3 系列，采用 B 级新绝缘结构，进一步缩小体积，降低了转动惯量，改善了调速和换向性能。对于中型电机，已由 ZD2、ZF2 系列代替了原来的 ZD、ZF 系列，提高了技术经济指标。对于大型电机，已生产了 4600 千瓦、70/120 转/分、额定转矩为 64 吨·米的可逆转轧钢直流电动机，5000 千瓦、500 转/分的直流发电机。

随着国民经济和国防建设的发展，工业生产自动化程度的不断提高，要求直流电动机具有更高的动态特性，较大的过载能力，更宽的调速范围，较低的转动惯量，不断提高产品的可靠性，耐用性和主要技术经济指标；在某些场合则要求提高大型直流电机的单机功率；要求发展更多能适应特种用途和在特殊环境条件下使用的专用直流电机。

由于直流电机的生产不断发展，对直流电机的要求日益提高，在直流电机设计方面应该积极开展的工作是多方面的。如结合新技术、新工艺、新材料的发展，不断改进电机的结构；提高产品的系列化、部件的通用化和零件的标准化程度；扩大电子计算机在设计上的应用；进一步对直流电机的电磁场、换向、通风散热和振动噪声等问题的研究等。

1-1 直流电机的特点和用途

一、直流电机的特点

和其他旋转电机一样，一般的直流电机在结构上具有旋转部分和静止部分；在作用原理上实现机电能量的转换；在性能上使发电机的电压或电动机的转速能满足使用要求。除此之外，直流电机还有其他特点。

直流电机在结构上的特点是：具有旋转的电枢和换向器；

旋转的换向器和静止的电刷装置间构成滑动接触，使外电路和电枢绕组相联通；磁极是静止的，它所产生的磁场是稳定的。

直流电机的磁极可以用具有励磁绕组的铁心做成，也可以用永久磁钢做成，前者用于一般的直流电机，后者常用于控制用直流电机或特种直流电机。励磁绕组有并励绕组和串励绕组两类，根据它们的不同联接情况可以形成他励、并励、串励和复励四种不同的励磁方式。不同的励磁方式使直流电机具有不同的特性，可以适应不同的用途。

直流电机的大小一般按电枢直径尺寸来划分：电枢直径小于或等于368毫米的，通称为小型直流电机；电枢直径大于368毫米而又小于或等于990毫米的，通称为中型直流电机；电枢直径大于990毫米的，通称为大型直流电机。

直流电动机在性能方面的特点是：能够在宽广范围内平滑而又方便地无级调速；可实现频繁的快速起动、制动和反转；具有较高的过载能力，能够承受频繁的冲击负载；能适应生产过程自动化的要求，根据不同设备的需要而制造出满足其特殊要求的运行特性。

直流发电机在性能方面的特点是：输出电压易于调节或控制；能够满足不同控制系统所要求的电源特性；具有较大的过载能力。

二、直流电机的用途

直流电动机广泛用于矿山机械、冶金、轧钢、起重、船舶、电传动机车、机床、纺织、印染、造纸、印刷、水泥和化工等工业设备中需要宽广调速的动力系统和自动化控制系统。直流发电机常作为直流供电电源和同步电机的励磁机等。具体来说，他励或并励电动机用于起动转矩不大的恒速负载或要求调速

的传动系统，如离心泵、风扇、金属切削机床 纺织印染机械、造纸机和印刷机等。复励电动机用于起动转矩较大而转速变化不大的负载，如空气压缩机和冶金辅助传动机械等。串励电动机用于高起动转矩、转速允许有较大变化的负载，如蓄电池供电车、起货机、起锚机、电车、电传动机车等。他励发电机常用于电动机——发电机——电动机系统中，实现直流电动机的宽广调速。并励发电机常作为充电、冶炼、电解、电镀等用的直流电源。积复励发电机常作为电压变化较小的一般直流供电电源。

1-2 直流电机的结构

直流电机结构如图 1-1 所示。其主要组成部分有：

(1) 定子部分：包括机座、主磁极、换向极和补偿绕组等；

(2) 电枢部分：包括电枢铁心、电枢绕组和换向器等；

(3) 电刷装置部分：包括电刷、刷握、刷杆和导电环等；

(4) 机械支撑部分：包括转轴、端盖、轴承和底板等；

(5) 通风和防护装置部分：包括风扇或风机、冷却器、过滤器、防护端罩和档风板等。

这些零部件要能够承受电机的机械负载(包括冲击性负载、电磁力和振动等)、电磁负载(包括过电压和过电流等)和热负载。有些零部件尺寸要经过计算后才能确定，有些则根据实践经验选取。合理的结构可以提高电机运行的可靠性、节约材料、提高劳动生产率和便于维护。

各种直流电机的结构是基本相似的，但也随功率大小、转速高低、冷却方式、防护类型、运行特性、安装型式与运输要求等因素而有所差异。常见的大、中、小型直流电机在结构上的某些主要差别是：

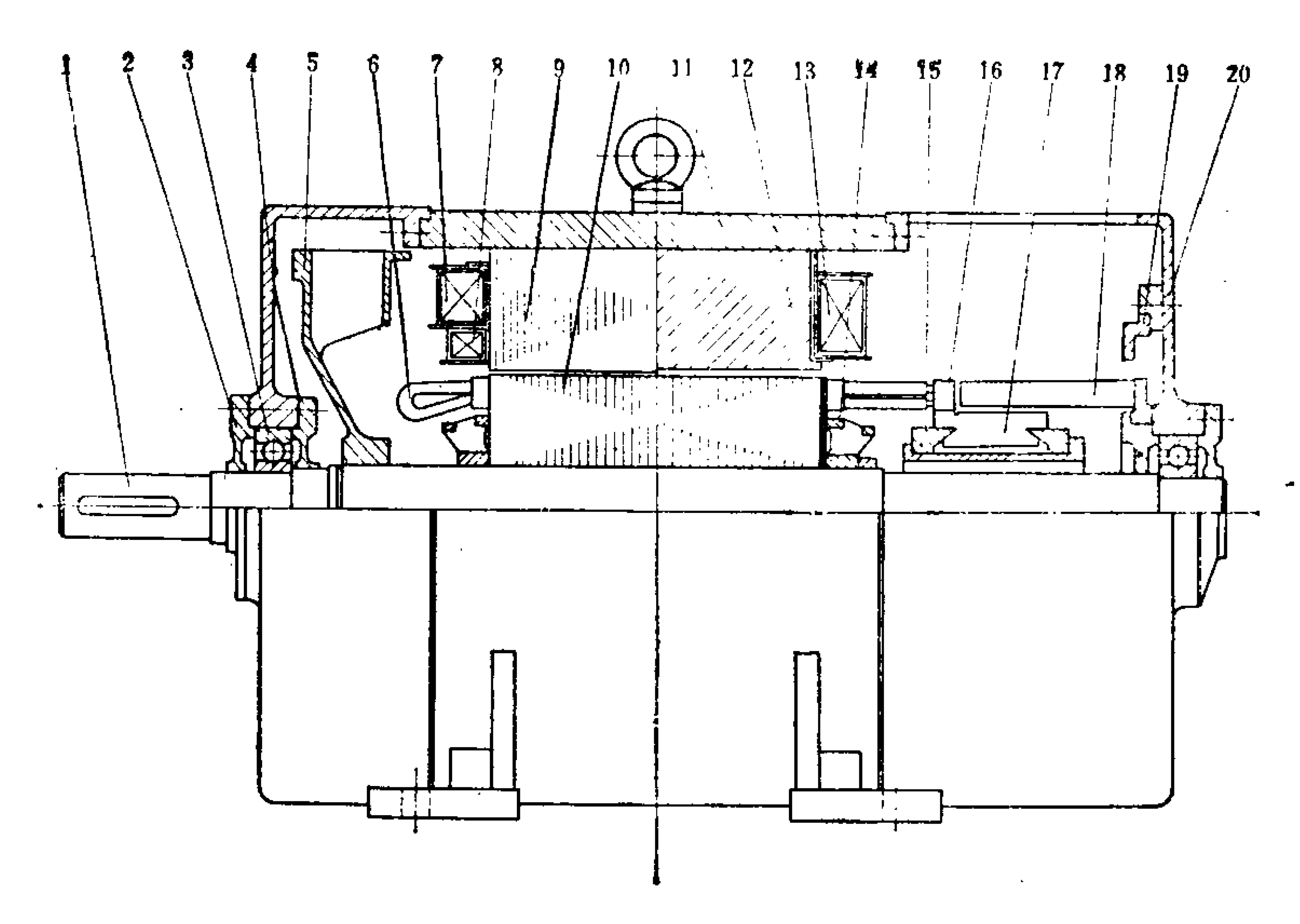


图 1-1　小型直流电机总体图

1—轴　2—轴承盖　3—轴承　4—端盖　5—风扇　6—电枢绕组　7—主磁极并励绕组　8—主磁极并励绕组　9—主磁极铁心　10—电枢铁心　11—机座　12—换向极铁心　13—换向极绕组　14—电枢铁心压圈　15—换向器压圈　16—升高片　17—换向片　18、19—电刷装置　20—端盖

(1) 通风冷却方式：中小型电机一般采用自冷或自扇式通风；而大型电机普遍采用强制循环通风或直通式通风；

(2) 定子机座结构方面：中小型电机常用铸钢、钢板焊接或叠片整体结构机座；而大型电机用铸钢、钢板焊接或叠片式分半结构机座；

(3) 电枢铁心结构方面：中小型电机用整圆冲片、叠片铁心直接套装在滚花或带键的轴上；部分中型电机采用整圆冲片叠装在电枢支架上；大型电机用扇形电枢冲片拼合成圆，冲片与支架间用切向和径向楔键或鸽尾筋固定；

(4) 轴承型式方面：小型电机常用滚动轴承；大中型电机

用座式滑动轴承。对载荷较大的滑动轴承，采用油盘式带油润滑和高压油泵顶起装置；

(5) 换向器方面：小型电机常采用塑料换向器、铆接式换向器或螺帽紧固式换向器，换向器直接套装在轴上；大型电机采用长螺杆紧固的拱式换向器或分段换向器，换向器悬挂地固定在电枢支架上、

(6) 电刷装置方面：小型电机的电刷装置固定在端盖上，刷握一般用直刷盒；部分中型电机及大型电机的刷握形式有直刷盒、斜刷盒；大型电机的电刷装置为分半结构，固定于定子机座或独立的支架上；

(7) 轴与原动机或传动机械的联接方式：小型电机一般采用弹性联接；大型电机采用刚性联接。

一、定子结构

直流电机定子的作用是用来产生磁场，并作为机械的支撑。它主要由机座、主磁极铁心和线圈、换向极铁心和线圈、补偿绕组、定子引线电缆等零部件组成，如图 1-2 所示。

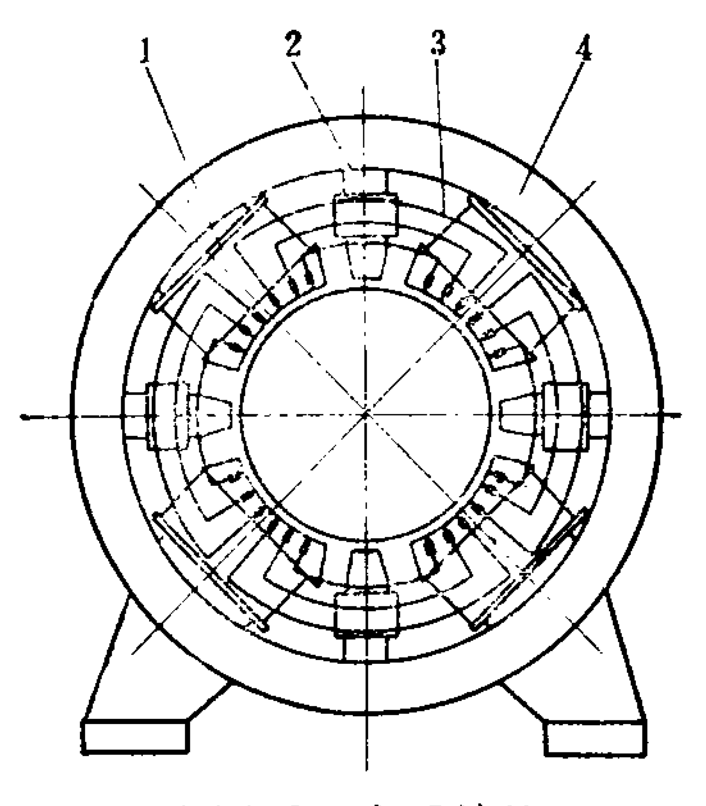


图 1-2　定子结构

1—主磁极　2—换向极
3—补偿绕组　4—机座

1. 机座

直流电机的机座是磁路的组成部分，也是固定主磁极、换向极、端盖(罩)等零部件的支撑件。它一般由导磁性能较好的铸钢或钢板焊接构成。机座壁厚主要取决于磁通密度的大小，同时也应有足够的刚度，使电机运行时不产

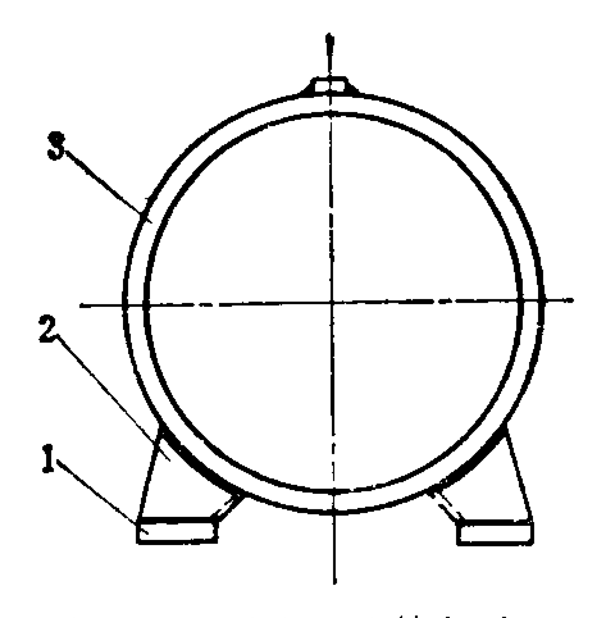


图 1-3 圆形整体机座
1—脚板 2—撑筋 3—磁轭

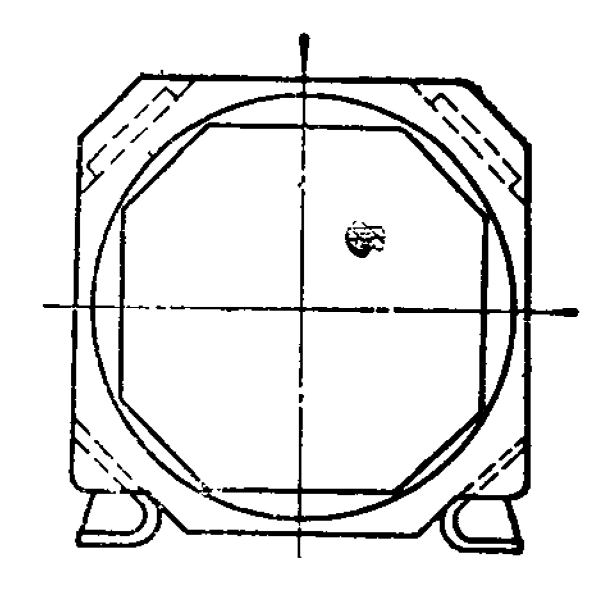


图 1-4 多边形整体机座

生有害的变形和振动。一般用途的中小型电机用圆形整体机座，见图 1-3。冶金起重、船舶牵引设备的电机常用多边形整体机座，见图 1-4，这种机座外形较小，磁极及其绕组的安置能够充分利用其内部空间。大型电机多用分半机座，以便于运输和安装。对磁路动态性能要求较高的电机，例如整流电源供电或负载经常快速变化的电机，常采用叠片机座，其中小型电机用整体迭片机座或隐极式叠片机座，大型电机用扇形片组合机座。隐极式叠片机座见图 1-5，其特点是在一张整形片上冲出磁轭、主磁极和换向极，机座内部空间可充分利用，定子体积显著减小，同时也有利于磁极绕组的散热。

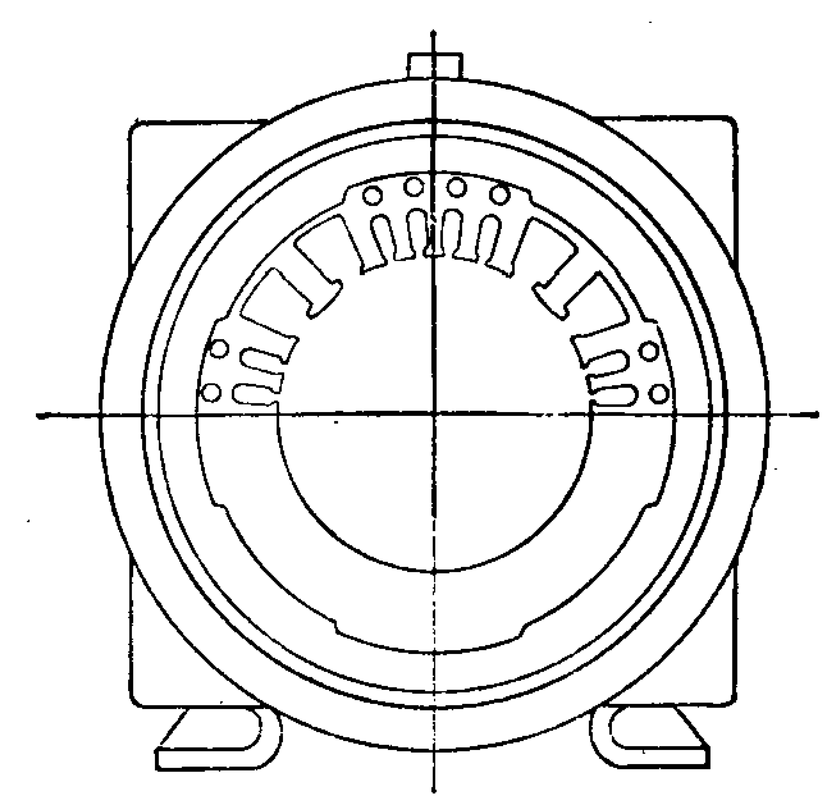


图 1-5 隐极式整圆叠片机座

2．主磁极

主磁极的作用是产生主磁通，它由铁心、线圈、磁极压板、极身绝缘和紧固件等组成。主磁极的结构如图 1-6 所示。主磁极一般是用螺栓固定在机座上。

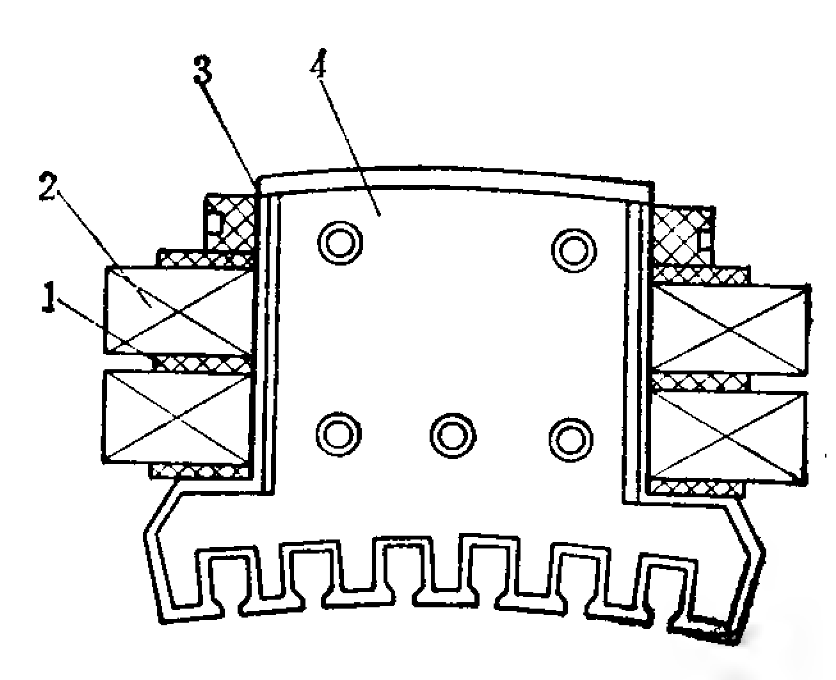


图 1-6　主磁极结构

1—绝缘垫板　2—线圈　3—绝缘　4—铁心

主磁极铁心常用1～2 毫米厚的薄钢板冲制叠压而成，以减少其表面的铁耗和减小励磁的时间常数。为了使冲片叠压时的压力均匀分布，在磁极两面安放磁极压板，其厚度按磁极的面积和长度而定，大中型电机一般在 6～20 毫米。小型电机在 2～4 毫米。磁极压板是用钢板制成的，也有用冲片点焊而成的。主磁极铁心的紧固按铁心的长短分别用焊接、铆接和螺杆紧固三种方法。

主磁极励磁绕组有并(他)励和串励两种，中小型电机的并励绕组一般用绝缘导线绕成；串励绕组和大型电机的他励绕组一般用裸铜(铝)扁线绕成。主磁极绕组的安排和布置应考虑到有利于绕组的通风冷却和有效地利用定子空间。

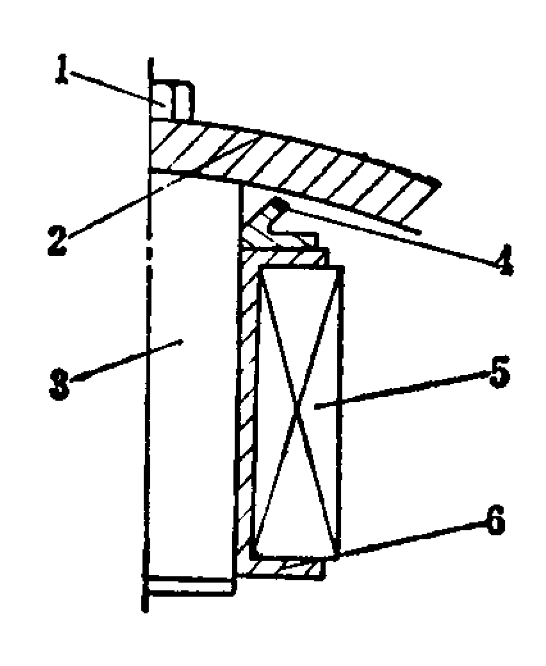


图 1-7　换向极铁心与用 V 形压板固定的换向极线圈

1—螺栓　2—机座　3—铁心　4—V 形压板　5—线圈　6—框架

3．换向极

换向极用以改善换向，它装在相邻主磁极间的几何中心线上，由换向

极铁心和换向极线圈组成，用螺杆固定在机座上，如图 1-7 所示。

中小型电机的换向极铁心由整块型钢制成。对于整流电源供电的电动机或牵引电动机等，为了使换向极磁通能跟随电枢电流的迅速变化，换向极铁心宜用 1～2 毫米厚的钢板冲片叠成，片间要涂覆绝缘层。

小型电机的换向极线圈一般用绝缘导线绕制；中、大型电机的换向极线圈常用裸铜(铝)扁线绕制。为了减少漏磁，换向极线圈的安装位置应尽量接近电枢表面。其固定方式有多种，对小型电机用框架或 V 形压板固定；对中型电机用托板固定；对大型电机用悬挂或线夹固定。

4. 补偿绕组

补偿绕组用来抵消主磁极极弧范围内的交轴电枢反应磁动势，以改善电机的换向性能。大中型电机通常有补偿绕组，小型电机仅在特殊情况下才装补偿绕组。

补偿绕组均匀分布在主磁极极靴的槽内，其基本结构型式有菱形、同心式和条式三种。菱形补偿绕组一般由漆包圆铜线绕制，用于梨形补偿槽的小型电机。同心式补偿绕组由外包绝缘的扁铜线绕制，用于开口补偿槽的中型电机，为了减少补偿齿槽对电枢表面铁耗的影响，应采用磁性槽楔。条式补偿绕组由裸铜排制成，分直线和端线两部分。嵌线时，将外包绝缘的直线部分穿入半闭口或闭口的补偿槽内，然后联接端线部分，组成线圈。为了防止补偿绕组在电磁力的作用下发生移动，应在端部用绝缘垫块和玻璃丝带绑扎。

二、电枢

直流电机的电枢是旋转部件，用以实现机电能量转换。它主要由轴、电枢铁心、电枢支架、电枢绕组、换向器和风扇等零

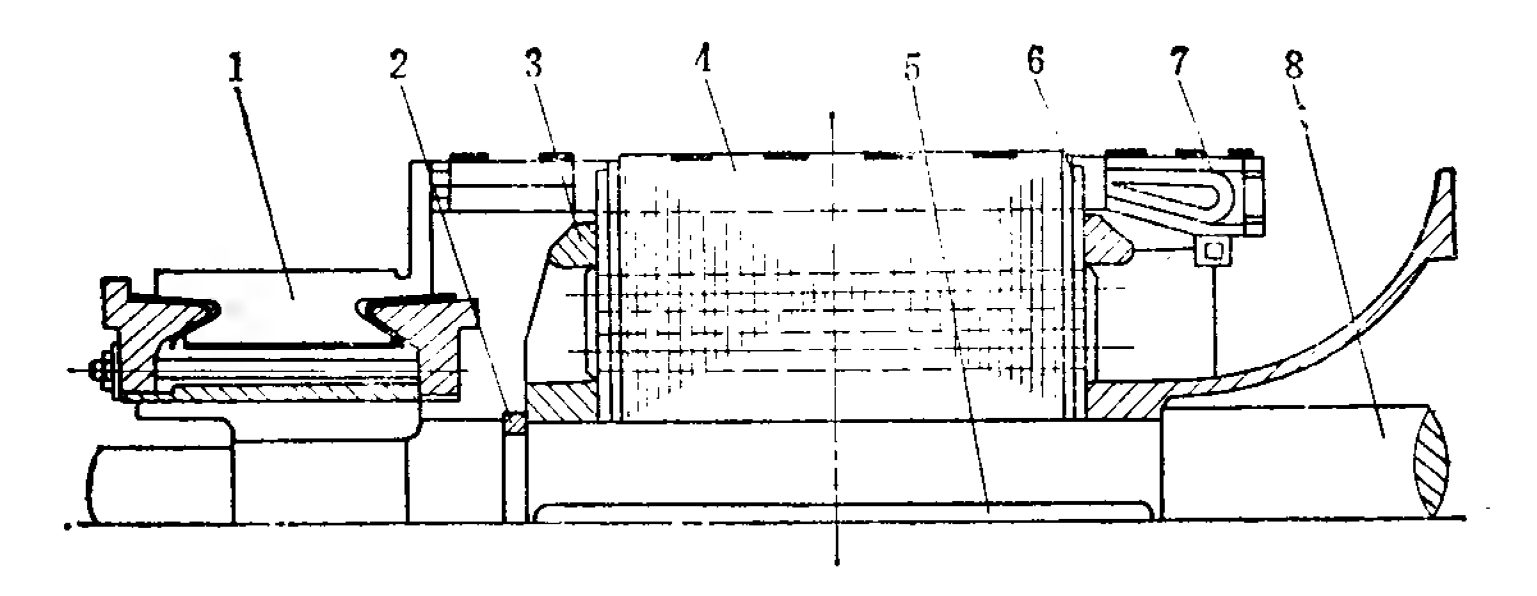


图 1-8　直流电动机的电枢结构

1—换向器 2—环键 3—压圈 4—冲片 5—键 6—压板 7—线圈 8—轴

部件组成。一般电机的电枢结构如图 1-8 所示。

1．轴

转轴的作用是担负电枢的全部重量和传递转矩。因此在电机运转时，它将承受扭矩、弯矩、单向磁拉力、轴向推力以及扭振时所产生的交变力矩。轴的结构和材料选取要保证有足够的强度和刚度。中小型电机的轴大多采用 35 号、40 号或 45 号圆钢，大型电机的轴一般采用 45 号圆钢或合金锻钢。轴的材料一般需经过热处理，以提高材料的机械强度及韧性。直流电机轴的结构大多数采用实心轴，此外还有锻焊复合轴和空心轴。锻焊复合轴由锻轴的本体经粗加工后与筋板焊成一体而组成，适用于电枢铁心较长、而在轴上加装支架有困难的部分中大型电机。空心轴是在电枢铁心段为空心轴，其他部分为实心轴，经焊接或用法兰螺栓联接而成，这样可以减轻重量和转动惯量，增加强度和刚度，常用于大型轧钢电机。

2．电枢铁心

电枢铁心是电机磁路的组成部分，又是电枢绕组的支撑件。它由 0.5 毫米厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成，以减少其磁滞和涡流损耗。中小型电机的铁心大多数直接压

装在轴上，中大型采用座式轴承的直流电机一般先将冲片压装在支架上，然后用键或热套将支架和轴固定。

电枢冲片分整圆冲片和扇形冲片两种，如图 1-9 所示。采用整圆冲片的电枢铁心结构简单，机械强度好，适用于电枢外径 $D_a \leqslant 990$ 毫米的中小型电机。扇形冲片为了能传递转矩和铁心叠片时定位，每张扇形片至少带有两个鸽尾槽(筋)和相应数量的螺杆孔，它适用于电枢外径 $D_a > 990$ 毫米的大型电机。为了保证电枢部分磁路对称，提高铁心叠装质量和材料的利用率，尽可能使每对主磁极下扇形叠片的接缝数为整数；一台电机最好用同一种扇形冲片，每片的槽数最好为整数；拉紧螺杆孔应均匀分布，孔数应为电枢支架筋数的整数倍；扇形片尺寸的决定应考虑到硅钢片的合理剪裁。

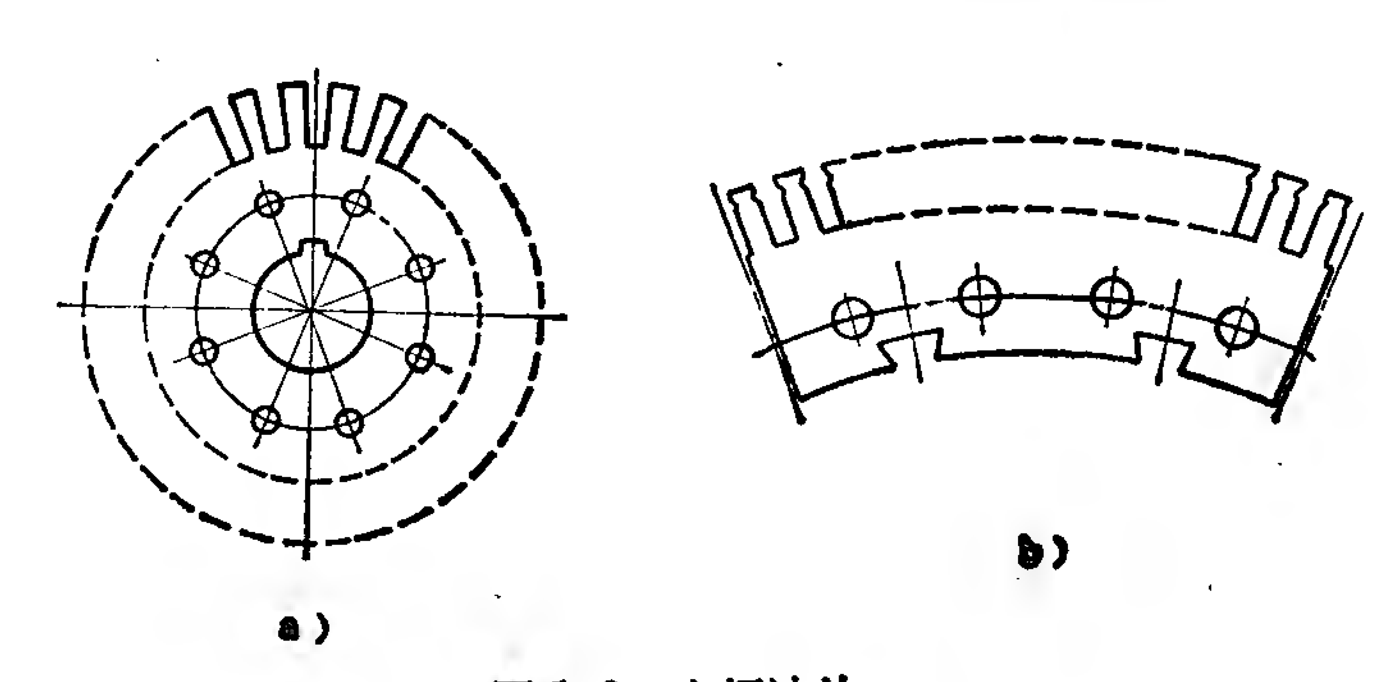


图 1-9　电枢冲片

a) 整圆冲片　b) 扇形冲片

3．电枢支架

电枢支架是电枢铁心的支撑件，能减轻电枢重量和有利于电枢的通风冷却。支架由铸钢浇铸或钢板焊接而成，中型电机采用星形支架，如图 1-10 所示；大型电机采用箱式星形支架，如图 1-11 所示。

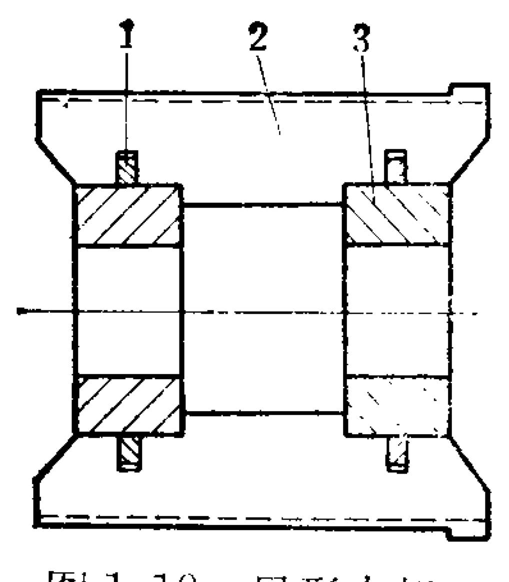


图 1-10　星形支架

1—板　2—筋　3—圆筒

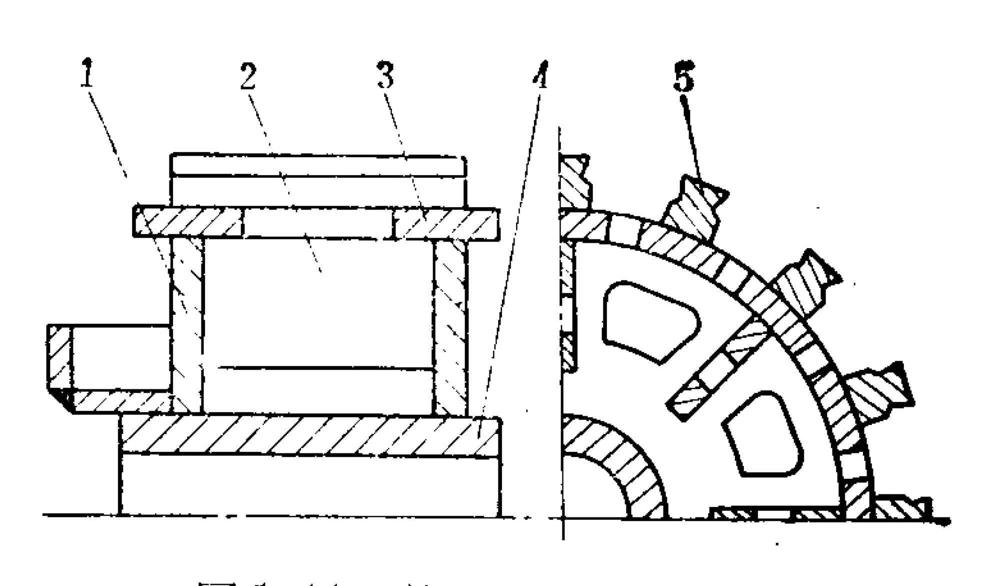


图 1-11　箱式星形支架

1—辐板　2—筋　3—圆筒　4—轮毂　5—筋

4. 电枢绕组

电枢绕组是用来感应电动势和通过电流，实现能量转换。它是由圆形或矩形截面的铜线绕成。通常先将绝缘铜线绕成形状一样、匝数相同的线圈，然后嵌入电枢铁心的槽中。线圈与铁心之间以及上、下层线圈之间要加以绝缘。线圈在槽内部分用槽楔锁住，而伸出槽外的端接部分大多数用合成树酯无纬玻璃丝带绑扎，有些大型电机的绕组端部用钢丝绑扎。各个线圈的端头与换向片之间以及各个绕组元件之间按一定的规律联接，组成电枢绕组。

5. 换向器

换向器是直流电机的重要部件，它和电枢绕组相联接，并与电刷间保持滑动接触。它的作用是将电枢绕组中感应的交流电动势经过电刷变为直流电动势，或把外电路通入电刷的直流电流转换成电枢绕组中所需要的交流电流。换向器是由梯形截面的铜排和绝缘材料等紧固而成。

在电机运行时，换向器在传递电流的同时，要经受离心力和拉应力的作用，从而要求换向器具有足够的强度、刚度和片间压力。因此，在电机起动、制动或超速运转以及在允许的温

升限度内，换向器不应产生有害的变形；换向器的外圆表面要求光滑平整，具有较高的耐磨性、耐电弧性和耐热性；换向器应具有足够的对地绝缘、片间绝缘和爬电距离。

换向器的结构要力求简单，便于制造和维修。它的结构形式随电机的功率、电压和转速而有所区别。按照换向器紧固形式的不同，常见的结构形式有拱形换向器、塑料换向器、绑环式换向器和分段式换向器等几种，其中以拱式换向器的应用最为广泛。

拱式换向器主要依靠压圈在换向片鸽尾 30° 锥面所作用的压力 P_R 紧固的，在 3° 锥面留有小量间隙 δ，其受力原理见图 1-12。按紧固零件的不同，又可分为铆接式、螺帽式、螺栓式和螺杆式等。铆接式是依靠套筒把压圈铆紧，适用于换向器直径 $D_K=40\sim80$ 毫米的汽车电机。螺帽式是依靠与套筒配合的螺帽将压圈压紧，如图 1-13 所示，适用于 $D_K<250$ 毫米和换向器长度 $l_K<300$ 毫米的中小型电机。螺栓式是用标准螺栓将压圈压紧，适用范围与螺帽式基本相同。螺

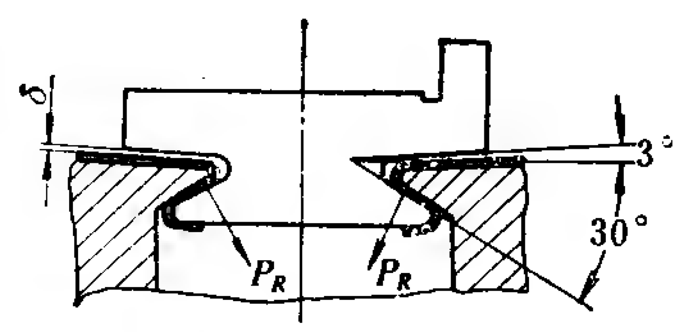


图 1-12　拱式换向器的受力原理图

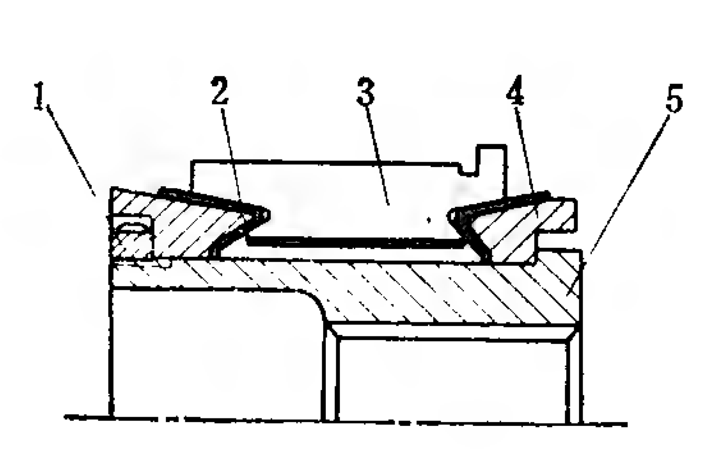


图 1-13　螺帽式换向器

1—螺帽　2—V 型圈　3—换向片　4—压圈　5—套筒

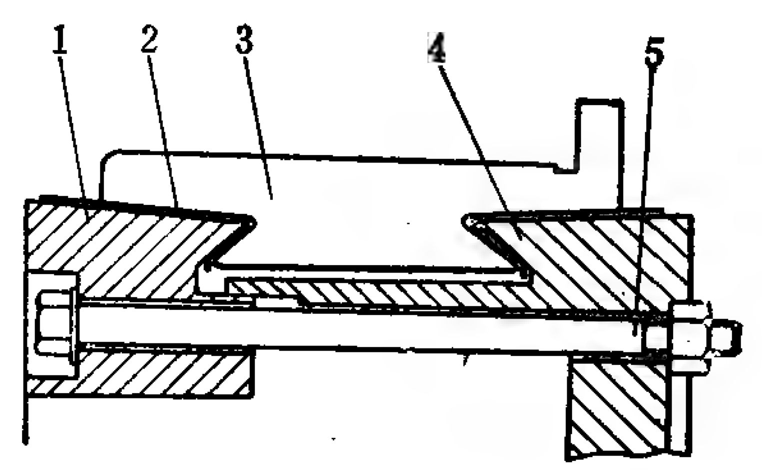


图 1-14　螺杆式换向器

1—压圈　2—V 形绝缘环　3—换向器片　4—套筒　5—螺杆

杆式是采用拉紧螺杆来紧固换向器，其主要特点是当换向片受热膨胀时，螺杆也能相应拉伸，以免换向器受过大的应力而变形，如图 1-14 所示，适用于 $D_K<300$ 毫米或 $l_K>300$ 毫米的电机。

塑料换向器是在换向片所围成的圆柱内腔充注塑料压制而成。换向片铜排呈工字形结构，或在铜片中间再增加Ω形，以提高换向器强度，如图 1-15 所示。塑料换向器具有结构简单，制造方便，节约金属和云母材料，成本低廉等优点，但是由于塑料的机械强度、导热性、耐电弧性较差，损坏后难以修理，因此其应用尚限于小型电机中。

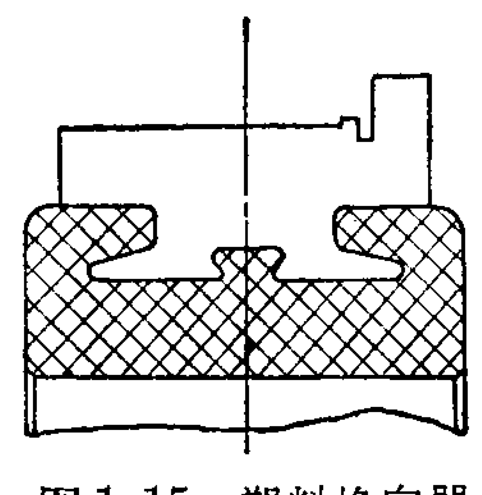


图 1-15　塑料换向器

绑环式换向器是用合金钢绑环通过热套紧固换向片，绑环与换向片间有 1～1.5 毫米的过盈，绑环下用天然云母绝缘，绑环数目根据换向器的直径和长度而定，适用于换向器的圆周速度 $v_K>40$ 米/秒的高速电机，如图 1-16 所示。

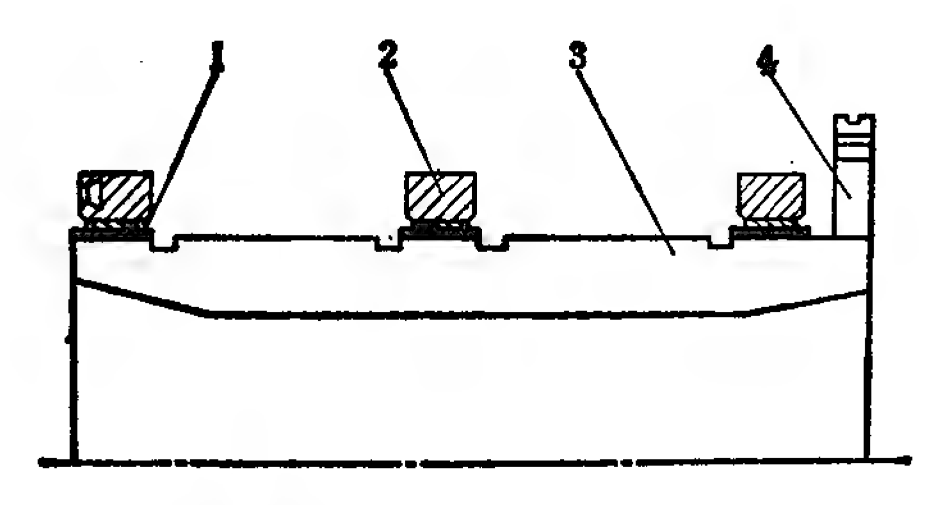


图 1-16　绑环式换向器

1—绝缘片　2—绑环　3—换向片　4—升高片

分段式换向器是将换向器分成二段或数段，以防止拱形变形。各段换向器之间用联接片联接，而最外面两端压圈仍

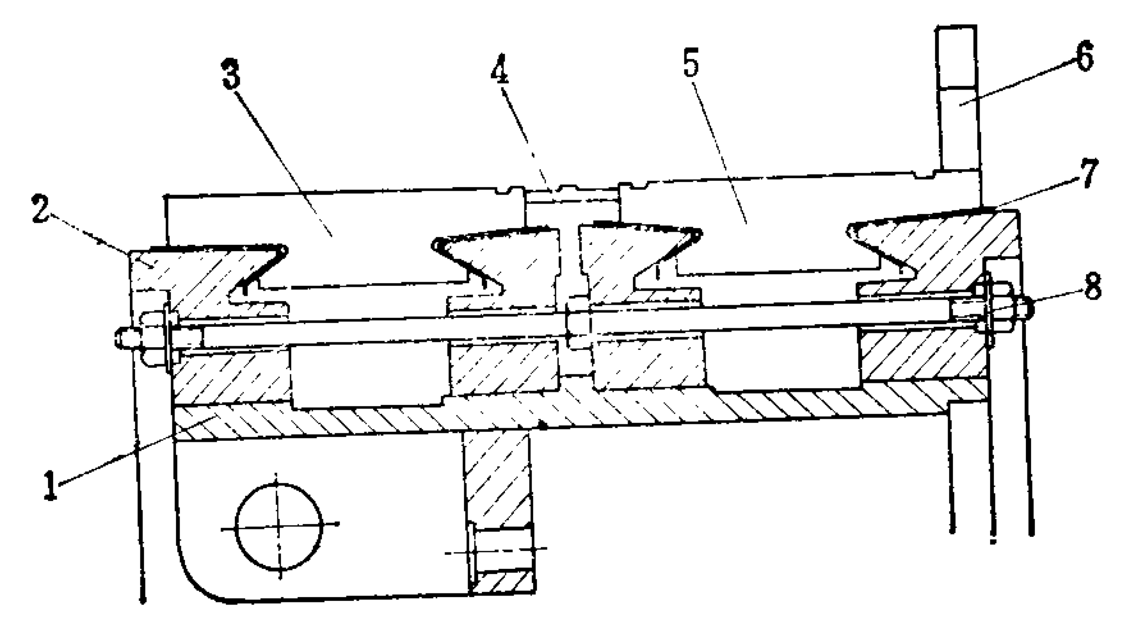


图 1-17　分段换向器

1—套筒　2—压圈　3—换向器片　4—联接片　5—换向器片
6—升高片　7—V 形绝缘环　8—螺杆

用同一螺杆拉紧，如图 1-17 所示。这种换向器适用于换向器直径大、$l_K>500$ 毫米的大型电机。

换向片的材料常用冷拉或冷轧的硬铜。为了提高其导电、耐磨、耐热、耐电弧和机械强度等性能，也有采用银铜(含银 0.07～0.02%)、铬铜(含铬 0.4～0.6%)、镉铜(含镉 1%)、锆铜(含锆 0.2%)、稀土铜(含镧 0.1%)等合金。

片间的绝缘材料应低于换向器表面，其材料根据电机耐热等级采用相应的云母板，如 553 虫胶换向器云母板(B 级)、硅有机或磷酸胺换向器云母板(F、H 级)。

V 形绝缘环是换向片与压圈间的对地绝缘，一般常用虫胶塑型云母板，多元酸塑型云母板或环氧玻璃胚布(B 级)，硅有机塑型云母板、聚芳烷基醚-酚上胶玻璃布(F、H 级)，经热压而成。

塑料换向器的压塑料一般常用酚醛树脂(B 级)和聚胺酰亚胺(F、H 级)两种热固性塑料，其填充材料为玻璃纤维。

换向器的直径总是小于电枢直径。为了使电枢绕组的接头与换向片相联，可借助于升高片。升高片是换向片与电枢

绕组的中间联接零件。在小型电机中，换向器直径与电枢直径相差较小，也可将换向片的一端加高来省去升高片。升高片一般用厚度为0.6～1毫米的硬紫铜板或用厚1～1.6毫米韧性好的特制紫铜带制成。常见升高片的形状如图1-18所示。在大型电机中，升高片较长，在可逆转运行或电机扭振情况下，升高片容易变形或引起谐振，严重时将使升高片折断，为此，需将升高片适当固定。

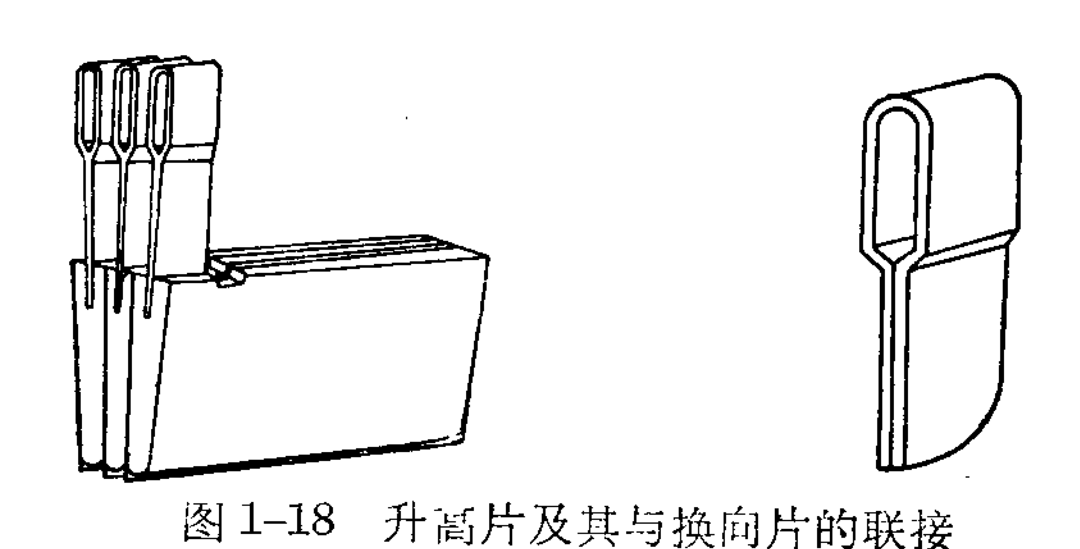


图1-18 升高片及其与换向片的联接

三、电刷装置

电刷装置是直流电机的主要导电部分，它和旋转的换向器之间保持滑动接触，使电枢绕组和外电路相联。电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座等零件组成，见图1-19。电刷放在刷握的刷盒内，用弹簧将它压紧在换向器上。刷握固定在刷杆上，刷杆装在刷杆座上，刷杆与刷杆座间要加以绝缘。中小型电机的刷杆座装在端盖或轴承内盖上，大中型电机的刷杆座则固定在机座上。

对电刷装置的要求是：应有足够的刚度，使电机在正常运行时不产生有害的变形和机械振动；电刷的牌号和刷握结构应使电机换向良好提供必要的条件；刷杆座、刷握位置以及弹簧压力要能调节，并便于维护和更换电刷；电刷在换向器表面的布置要合理，使换向器表面的磨损机会均等。

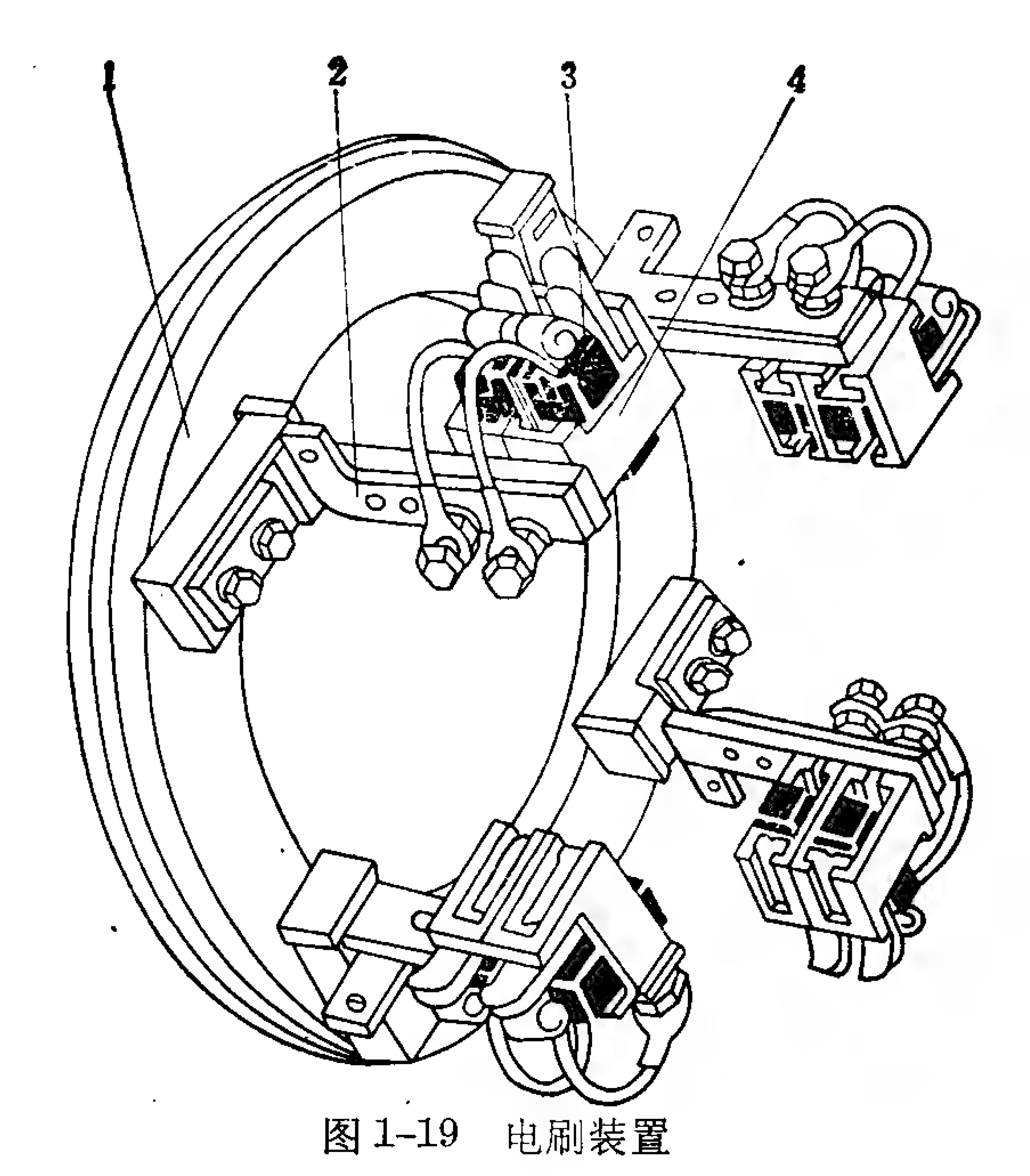


图 1-19　电刷装置

1—刷杆座　2—刷杆　3—电刷　4—刷握

刷握由刷盒、弹簧、压指等零件组成。电刷在刷盒内应能上下自由滑动，使它对换向器表面具有良好的跟随性。全部电刷的压力应基本均衡，在电刷磨损的过程中，电刷的压力能保持大致不变。常用的刷握结构型式有直刷握和斜刷握两种，直刷握一般用于正逆转的中小型电机中，而斜刷握多用于大型电机。

四、轴承装置

轴承的作用是支持电枢的重量和其他的作用力（如皮带的径向力和单向磁拉力等），并使电枢能灵活转动。中小型电机采用滚动轴承，大中型电机采用座式滑动轴承。

1．滚动轴承

一般的中小型电机在换向器端采用单列向心球轴承，并在轴向固定；在轴伸端采用单列向心球轴承或单列圆柱滚子轴承，可沿轴向游动，以适应轴的热膨胀。对于一般立式安装的电机，需另加单列止推轴承，以承受轴向力。

滚动轴承的两侧装有轴承内、外盖，在它内腔的三分之二空间装有润滑油脂。为了防止油脂溢出，轴承盖在其内孔开有沟槽，嵌入橡胶密封圈；有的在其内孔做成迷宫式。

2．滑动轴承

滑动轴承不能承受轴向力。对滑动轴承的要求是：要有足够的机械强度，有良好的润滑性能和可靠的密封性。滑动轴承按润滑方式可分为油环润滑轴承、油盘供油润滑轴承、强制润滑轴承和复合润滑轴承；按轴瓦的形状可分为圆柱形轴瓦和球形轴瓦；按轴承的受力情况可分为普通轴承和止推轴承。

滑动轴承主要由轴瓦和轴承座组成。轴瓦的材料采用铸铁或铸钢，内孔浇铸巴氏合金作为与轴的摩擦面，巴氏合金和瓦体用燕尾环形沟固定。轴承座采用铸铁或铸钢浇成，也有用钢板焊成。滑动轴承采用机油润滑，使轴和轴瓦之间形成液体摩擦，在轴瓦侧面装有挡油板，并在轴承两端装有带迷宫槽的轴承盖。

在电机运行中，由于磁场可能发生的不对称，在转轴、轴承和底板所形成的回路中将产生电压和电流，这个电流称为轴电流。由于回路的电阻很小，因此电流可能很大，往往会使轴瓦熔化或轴颈烧伤。预防轴电流的措施是把轴承和底板之间用绝缘材料隔离，对电机的两个轴承只要绝缘其中的一个即可。

五、端盖

端盖是保护电机内部和构成风路的一个部件，中小型电

机的滚动轴承安装在端盖上，所以这时端盖还起着支撑电枢的作用。端盖一般用铸铁做成，经止口与机座配合，用螺栓固定在机座上。有的电机的出线盒也装在端盖上。为了便于检修，大型电机的端盖有时采用可移式结构，即下面装滚轮，可轴向移动。因此，对端盖的结构设计要求刚度好，加工、维护、拆装方便，通风效果好和外形美观。

1-3 直流电机的主要系列

为了满足各行业中不同的运行要求，电机制造成不同型号的系列。所谓系列电机，就是指电机的结构和形状基本相似，技术要求基本相同，电压、转速、机座号、铁心长度和安装尺寸等都有一定的标准等级，电机的功率按一定的比例递增，

表 1-1 直流电机的主要系列

产品名称	系列型号	原用系列型号
直流电动机	Z	Z、ZD、ZJD
直流发电机	ZF	Z、ZF、ZJF
广调速直流电动机	ZT	ZT
冶金起重直流电动机	ZZJ	ZZ、ZZK、ZZY
直流牵引电动机	ZQ	ZQ
船用直流电动机	Z-H	Z2C、ZH
船用直流发电机	ZF-H	Z2C、ZFH
精密机床用直流电动机	ZJ	ZJD
汽车起动电动机	ST	ST
汽车发电机	F	F
挖掘机用直流电动机	ZKJ	ZZC
龙门刨床用直流电动机	ZU	ZBD
防爆安全型直流电动机	ZA	Z
无槽直流电动机	ZW	ZWC
力矩直流电动机	ZLJ	

零部件相似并且尽可能地通用。其中使用范围广、产量大的一般用途电机作为基本系列，为满足某些特殊用途的要求，在基本系列的基础上作部分改动，可导出若干派生系列，此外，还有专门设计制造的专用系列。电机的系列化可以使产量大、配套使用面广、品种规格多的产品便于大批量生产，以提高生产率和质量。

我国目前的主要直流电机系列如表1-1所示。

1-4 额定值与技术要求

直流电机的额定值和技术要求是根据用户的使用需要，结合工厂的制造条件协商制订的。直流电机在规定的使用环境和运行条件下，额定值主要是指额定输出功率、额定电压和额定转速；技术要求包括运行方式、防护型式、励磁方式、效率、温升、换向火花和转速（或电压）变化率等内容。设计生产的电机必须符合这些额定值和技术要求，因此要在整个设计过程中结合国家标准（主要是GB755-65《电机基本技术要求》）予以考虑。

一、额定值

1. 额定功率 P_N

额定功率就是电机的额定负载，对直流发电机是指线端输出的电功率，对直流电动机是指轴端输出的机械功率。电机的功率等级应按一定的数系递增，如果选取较小的功率递增系数，则配套使用时可减少过安装容量和过安装费用，但使电机品种数目增多，电机制造工艺装备增加，生产管理复杂，导致制造成本上升。因此，功率等级应权衡生产和使用的需要加以合理地制订。

直流电机的功率等级如表1-2所示。

表 1-2 直流电机的功率等级(单位: 千瓦)

直流电动机											
0.37	0.55	0.75	1.1	1.5	2.2	3	4	5.5	7.5	10	13
17	22	30	40	55	75	100	125	160	200	250	320
400	500	630	800	1000	1250	1600	2050	2600	3300	4300	5350
6700											
直流发电机											
0.7	1.0	1.4	1.9	2.5	3.5	4.8	6.5	9	11.5	14	19
26	35	48	67	90	115	145	185	240	300	370	470
580	730	920	1150	1450	1900	2400	300	3600	4600	5700	

直流电动机采用硬性功率等级，即同一功率数值应用于不同的额定转速。功率在 100 千瓦以下基本上是按比值 1.35 递增的；100 千瓦到 1600 千瓦是按 R10 数系(即比值为 $\sqrt[10]{10}\approx1.25$)递增的。直流发电机的功率等级是从电动机——发电机——电动机的动力系统考虑确定的，在 1450 千瓦以下的直流发电机，它的额定功率与交流异步电动机的功率相匹配，在 1450 千瓦以上的直流发电机，其功率与所供电的直流电动机功率相匹配。

2. 额定电压 U_N

额定电压 U_N 是指电机在额定运行时的端电压。直流电机的额定电压等级见表 1-3。一般用途基本系列直流发电机的额定电压在 115 伏以上。此外，还可以根据生产实际的需要，选用特殊规格的额定电压。

3. 额定转速

电机的额定转速是指额定负载下的转速。直流电机的转速等级见表 1-4。

直流电动机的转速等级，在 500 转/分及其以上按交流电

表 1-3　直流电机的电压等级(单位:伏)

直流电动机										
110	160	220	(330)	440	630 (660)	800	1000			
直流发电机										
6	12	24	36	48	72	115	230	(330)	460	630 (660)
800	1000									

表中有括号的电压不常使用。

表 1-4　直流电机的转速等级(单位:转/分)

直流电动机										
3000	1500	1000	750	600	500	400	320	250	200	160
125	100	80	63	50	40	32	25			
直流发电机										
3000	1500	1000	750	600	500	427	375	333	300	

机的同步转速等级;在 500 转/分以下按 $R10$ 数系分级。直流发电机按交流电机的同步转速分级,也可用相应的异步电动机的转速,即 2850 转/分相应于 3000 转/分,1450 转/分相应于 1500 转/分,960 转/分相应于 1000 转/分等等。

二、技术要求

1. 运行方式

电机的运行方式有连续、短时和断续三种。连续定额电机能按额定值长期连续运行。短时定额电机按额定值从实际冷态开始在规定的持续时间限值内运行,时间限值分 10、30、60 和 90 分钟四种。断续定额电机按额定负载运行一段时间后就断电停转一段时间,再按同样的周期反复运行,标准的持

续率有15%、25%、40%、60%四种。在同样的功率和同样的温升限制下，断续或短时定额电机的尺寸要比连续定额电机的小。

2. 防护型式

电机的防护型式直接影响电机的结构及通风散热，在设计时必须予以注意。直流电机的防护型式主要有防护式和封闭式两种。防护式电机的机壳对于内部的转动部分和导电部分有必要的机械保护，以防止意外的接触，但并不显著地妨碍通风。封闭式电机的结构能阻止机壳内外空气的自由交换，但并不要求完全密封，可用于尘埃较多的场所。

3. 励磁方式

直流电机的励磁方式有他励、并励、串励和复励四种。根据给定的励磁方式，设计相应的励磁绕组。

4. 温升

在电机运行过程中，由于它本身内部的损耗而产生热量，从而导致电机各部分的温度升高，温升超过限度，会使绝缘材料加速老化，寿命缩短。电机温升的允许值决定于绝缘的耐热等级，关于绝缘的耐热等级及其相应的材料见第三章。在海拔不超过1000米、冷却介质温度不超过40°C时，直流电机各发热部分在额定工作状况下的允许温升不得超过表1-5的规定。

5. 换向火花

按照有关规定，直流电机从空载至所规定的过电流（超过额定电流50%历时15秒以上）或过转矩（超过额定转矩60%历时15秒而没有转速突变或停转）的情况下，应没有有害的火花，换向器和电刷的表面无永久性的损害。在设计时，应从各方面考虑改善换向以控制火花。

表 1-5　直流电机各部分的允许温升

电机所属部分	E级		B级		F级	
	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法	温度计法	电阻法
电枢绕组和磁极绕组	65°C	75°C	70°C	80°C	85°C	100°C
表面裸露的单层磁极绕组		80°C		90°C		110°C
换向器	70°C		80°C		90°C	
轴承	55°C		55°C			

6．效率

电机的效率影响电能的有效利用，也影响温升，它是衡量电机质量的指标之一。因此，各类电机在额定运行时的效率在有关技术条件中都有具体数值规定，同时还规定效率的容差。在设计电机时要保证达到规定的效率。

7．发电机的电压变化率

复励直流发电机，在绕组接近工作温度，运行于额定转速且励磁变阻器位置保持不变时，其电压变化率 $\Delta U\%$ 在技术条件中也常有规定。Z3 系列发电机的电压变化率如表 1-6 所示，并规定其容差为 ±2% 额定电压。

表 1-6　Z3 系列复励发电机的电压变化率

电机功率（千瓦）	电压变化率 $\Delta U\%$
$P_N \leqslant 14$	-3 $+7$
$14 < P_N \leqslant 48$	-2 $+6$
$P_N > 48$	$+6$

8. 电动机的转速变化率

并励直流电动机，当绕组接近工作温度、端电压保持不变时，由额定负载逐渐调至空载，其额定转速时的转速变化率 $\Delta n\%$ 应不超过表 1-7 的规定。转速变化率的容差为保证值的 20%。

表 1-7 直流电动机的转速变化率

额定功率(瓦)与额定转速(转/分)之比	转速变化率 $\Delta n\%$
<0.67	≤18
≥0.67 至 <2.5	≤15
≥2.5 至 <10	≤12
≥10	≤10

电机的技术要求除上述外，还应满足绝缘强度、过载能力、超速能力、振动、噪声以及安装尺寸等方面的要求。

1-5 设计的任务

电机制造厂中，一般是进行系列电机的设计，只有在额定值、运行性能和结构有特殊要求时，才进行单个电机的设计。

根据给定的额定值和技术要求，进行单个设计的基本步骤是：

(1) 参考过去产品设计及制造中的经验，拟订电磁设计和结构设计的方案，包括确定主要尺寸，选定电磁负荷，决定绝缘等级，考虑结构轮廓，安排通风风路以及利用其他有关资料；

(2) 选定主要材料及其规格和指标，包括绝缘材料、导磁材料和导电材料等；

(3) 进行电磁设计，计算零部件的有关尺寸和电机的各

项性能，必要时加以局部调整或多方案比较，最后选定经济合理的方案；

(4) 进行结构设计和机械计算，绘制电机整套图纸。应该注意，电磁设计和结构设计有时还要交叉进行，以便相互进行调整；

(5) 画出结构草图后，在认为需要时可以进行通风计算和温升计算。

在设计时既要保证电机运行可靠、性能优良、效率高和寿命长，又要体积小、重量轻、材料省、加工方便，很多因素是相互矛盾和相互制约的。对设计的要求是全面考虑，统筹兼顾，根据技术政策从总的方面来看具有先进的技术经济指标。

对于系列电机的设计，除了每一台电机要进行单个电机设计的工作外，还需要另外考虑如下问题：

(1) 确定功率等级与机座中心高的对应关系。当功率等级确定后，如果一个机座中心高尺寸对应于过多的功率等级，虽然可以减少电机制造的工艺装备和便于用户安装使用，但会导致电磁设计不够合理，材料不能充分利用。因此，设计时应考虑整个系列的技术经济指标，在设计过程中往往需要进行多方案的计算比较；

(2) 加强零部件的标准化、系列化和通用化。零件应尽量采用标准件和标准尺寸、标准结构。按系列要求合理安排同类型零部件的尺寸。在整个系列中尽量考虑零部件的通用程度，以减少零部件的规格数目；

(3) 考虑派生系列的可能性。在进行基本系列设计时，应尽量为派生系列留有余地。这就是说，在基本系列的基础上，有可能改换部分零部件或增添某些措施，就可以满足特殊性能、特殊环境或特殊使用条件等要求，从而产生派生系列，

第二章　主要尺寸的决定

前已述及，电机设计的任务是：根据给定的额定值和技术要求选用合适的材料，决定电机各部分的尺寸，计算其性能，以达到节省材料、制造方便、性能好等要求。电机中各部分的尺寸很多，在进行电机设计时，一般从决定主要尺寸开始。直流电机的主要尺寸是指电枢外径 D_a 和电枢长度 l_a。之所以要把这两个尺寸作为主要尺寸，是因为电枢的外径及长度与电机的额定功率直接相关。在一定的额定功率下，如果电枢的尺寸偏大，就会使钢和铜等原材料造成浪费；如果电枢的尺寸过小，又会使电机在温升、效率等方面不能达到规定的要求。电机的重量、价格和它的运行特性、可靠性等与 D_a、l_a 直接相关，因此主要尺寸是电机设计时的关键数据。其次，电枢尺寸一经选定后，电机的其他尺寸，如磁极、机座、端盖、电枢绕组、轴、轴承和换向器等等都可以随之相应确定。所以主要尺寸的确定应视为电机设计最基本的步骤。

2-1　主要尺寸与电磁负荷的关系

电机的电磁负荷是指电机的电负荷 A 和磁负荷 B_δ。它们与电机主要尺寸的确定直接相关，对电机的运行特性、效率、温升等也有很大的影响，所以，电磁负荷是电机设计中的重要参数。

电机的电负荷（或称线负荷）A 是指在电枢圆周表面每单位长度上导体中的总电流，即

$$A=\frac{\left(\frac{I_a}{2a}\right)N_a}{\pi D_a}=\frac{I_aN_a}{2a\pi D_a}\quad（安/厘米）\qquad(2-1)$$

式中　I_a——电枢电流(安);

N_a——电枢总导体数;

a——并联支路对数;

D_a——电枢外径(厘米)。

电机的磁负荷 B_δ 是指气隙磁通密度的最大值,即

$$B_\delta=\frac{\Phi}{\alpha'_p\tau l_\delta}\quad(高斯)\tag{2-2}$$

式中　Φ——每极主磁通(麦);

l_δ——电枢计算长度(厘米);

α'_p——计算极弧系数;

τ——极距(厘米)。

对于没有径向通风沟的小型电机,一般可以忽略电枢轴向两端磁通的边缘效应,于是可取

$$l_\delta=l_a\quad(厘米)\tag{2-3}$$

式中　l_a——电枢实际长度(厘米)。

对于有径向通风沟的中、大型电机,径向通风沟将铁心长度分成几段,径向通风沟的宽度一般为1厘米,每段铁心长度一般为5～10厘米。这时,在径向通风沟范围内的气隙磁通密度就低于铁心段内的气隙磁通密度,电枢的计算长度就应该比实际长度小。但是如果仍旧使电枢的计算长度等于实际长度,而把在径向通风沟范围内磁通密度的减少用气隙长度的增加来等效,结果是一样的。于是,我们在这里仍然取

$$l_\delta=l_a\quad(厘米)$$

而

$$l_a=l_{Fe}+N_{vr}b_v\tag{2-4}$$

式中　l_{Fe}——电枢铁心净长(厘米);

N_{vr}——径向通风沟数;

b_v——径向每个通风沟的宽度(厘米)。

关于气隙长度的相应增加，可以将气隙长度乘上一个计及通风沟的卡氏系数，见第五章。

对于均匀气隙的电机，计算极弧系数可用下式表示

$$\alpha'_p=\frac{b'_p}{\tau}=\frac{b_p+2\delta}{\tau} \tag{2-5a}$$

式中 b'_p——主磁极的极弧计算长度(厘米)；

b_p——主磁极的极弧长度(厘米)；

δ——气隙长度(厘米)。

对于不均匀气隙的电机，如磁极削角或偏心气隙等，计算极弧系数 α'_p 可用下式表示

$$\alpha'_p=\frac{b_p}{\tau}=\alpha_p \tag{2-5b}$$

式中 α_p——实际极弧系数。

从式(2-1)和(2-2)可以看出电、磁负荷与主要尺寸有关，下面将进一步研究它们之间的关系。

当直流电动机和发电机，工作在额定状态时，电枢绕组中都存在感应电动势 E_a(伏)和电流 I_a(安)，E_a 和 I_a 的乘积就是机电能量相互转换的电磁功率 P_{em}，即

$$P_{em}=E_aI_a\times10^{-3}\quad(\text{千瓦}) \tag{2-6}$$

把其中的 E_a、I_a 分别用 A、B_δ、D_a、l_δ 来表示，就可以电磁功率为桥梁，找出电机在给定的功率和转速下主要尺寸与电磁负荷间的联系。具体步骤如下

电枢绕组的感应电动势

$$E_a=\frac{pn_N}{60}\frac{N_a}{a}\Phi\times10^{-8}\quad(\text{伏}) \tag{2-7}$$

式中 p——极对数；

n_N——电机的额定转速(转/分)。

按式(2-2)，每极主磁通

$$\Phi=\alpha_p'\tau l_\delta B_\delta \quad (麦)$$

其中极距

$$\tau=\frac{\pi D_a}{2p} \quad (厘米) \tag{2-8}$$

将ϕ代入式(2-7)得

$$E_a=\frac{pn_N}{60}\frac{N_a}{a}\alpha_p'\left(\frac{\pi D_a}{2p}\right)l_\delta B_\delta\times10^{-8} \quad (伏) \tag{2-9}$$

另外，按式(2-1)可以得到电枢绕组中的电流

$$I_a=\frac{2a\pi D_a}{N_a}A \quad (安) \tag{2-10}$$

将式(2-9)和(2-10)代入式(2-6)，可得电磁功率

$$P_{em}=\frac{pn_N}{60}\frac{N_a}{a}\alpha_p'\left(\frac{\pi D_a}{2p}\right)l_\delta B_\delta\frac{2a\pi D_a}{N_a}A\times10^{-11}$$

$$=\frac{\pi^2\alpha_p'}{60}B_\delta AD_a^2l_\delta n_N\times10^{-11}$$

整理上式得到

$$D_a^2l_\delta=\frac{6.1\times10^{11}}{\alpha_p'B_\delta A}\frac{P_{em}}{n_N} \tag{2-11}$$

关系式(2-11)是决定电机主要尺寸的依据。$D_a^2l_\delta$是正比于电枢铁心的圆柱体积，由于电机的结构尺寸之间具有一定的比例关系，所以$D_a^2l_\delta$也基本上正比于整个电机的体积。

从式(2-11)可以看出：

(1) 在电磁负荷A与B_δ一定时，电机的$D_a^2l_\delta$随电机的电磁功率的增加而增加，随电机的额定转速的增加而减少。由于$\frac{P_{em}}{n_N}$与电机的额定转矩成正比，因此也可以说$D_a^2l_\delta$取决于电机额定转矩的大小。输出为同一功率的电机，转速愈低

(即额定转矩愈大)，电机的体积也愈大；反之，转速愈高(即额定转矩愈小)，则电机的体积愈小。

(2) 对于同一功率和同一转速的电机，A、B_δ、α'_p 愈高，则电机的主要尺寸愈小，材料愈省。而要选用较高的 A、B_δ，将有赖于改善电机的通风散热条件和使用优质的导磁材料与绝缘材料。

对于所设计的电机，一般给定的是额定功率，而不是电磁功率。由于电磁功率是机电能量相互转换的功率，而额定功率是指输出功率，无论是电动机还是发电机，电磁功率比额定功率总是略大一些。当决定电机的主要尺寸时，P_{em} 可按下式进行估算

$$P_{em}=P_N\frac{1+\eta}{2\eta}\quad(\text{千瓦})\qquad(2\text{-}12)$$

式中 P_N——额定功率(千瓦)；

η——电机的效率，可按图 2-1 选取，转速高的电机取图中的上限值。

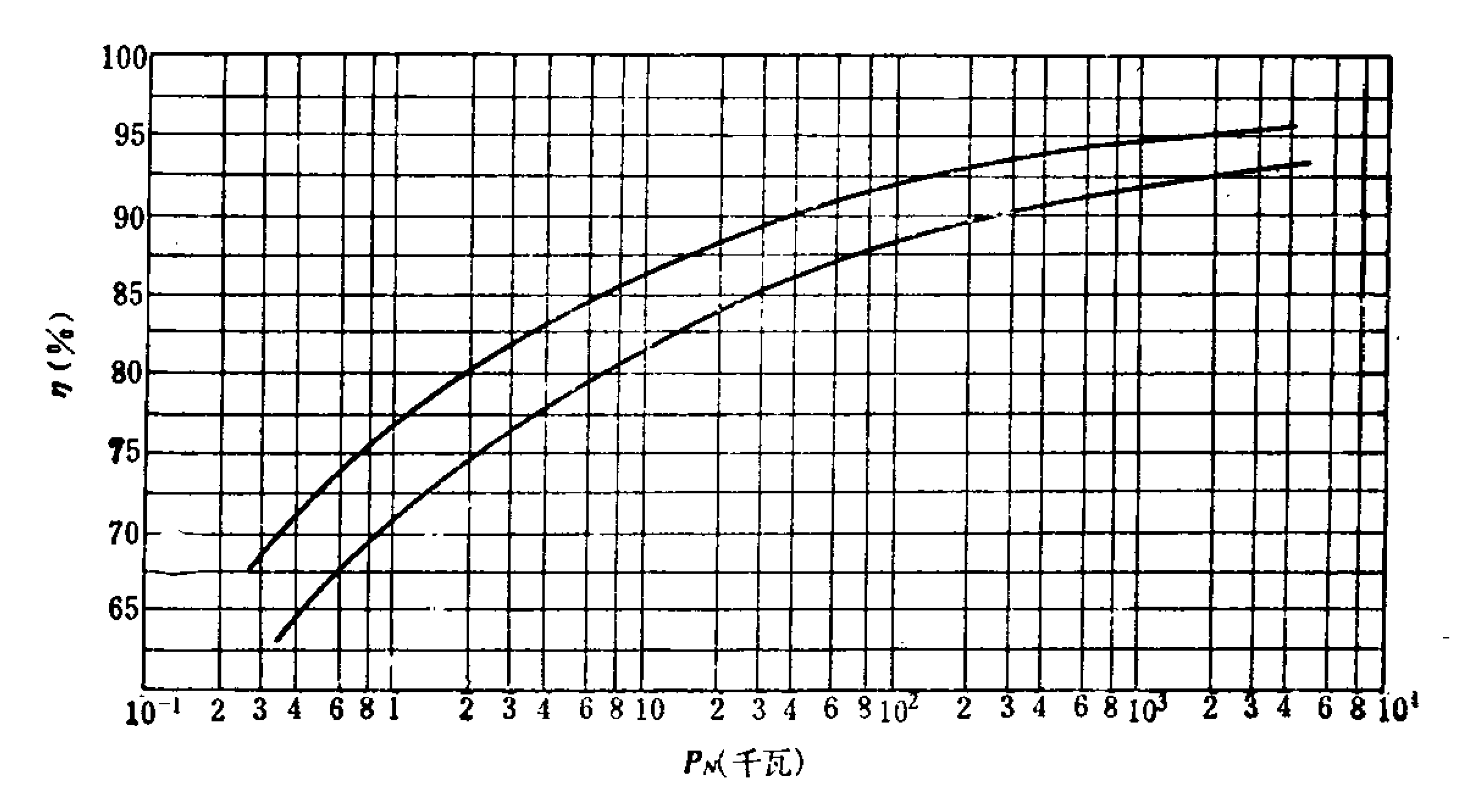


图 2-1　直流电机的效率与额定功率的关系

2-2 主要尺寸的选择

一、电枢外径 D_a 的选择

直流电机的电枢外径 D_a 一般随单位转速的输出功率 $\frac{P_N}{n_N}$ 值增加而增大，当电机的 $\frac{P_N}{n_N}$ 相同时，其 D_a 大致一样。决定 D_a 时，可根据给定的 $\frac{P_N}{n_N}$ 值和工厂的生产条件（如外圆冲模等工艺装备），参考已制成的类似电机的 D_a 而选定。我国目前制造的直流电机，其 D_a 与 $\frac{P_N}{n_N}$ 的关系曲线如图 2-2 所示，可以作为选定 D_a 的初步依据。

对应于不同的功率和转速，直流电机电枢外径的尺寸也不同。为了便于制造和节省原材料，D_a 的各种不同尺寸不是任意选定的，而是按一定的比值递增的，其递增的比值应考虑到整张硅钢片的合理剪裁、系列电机功率等级递增的配合和冲模装备的继承等因素，所以电枢外径是规范化的。根据我国生产的硅钢片规格和工厂的生产经验，目前规定了下面的直流电机的标准电枢外径：

7, 8.3, 10.2, 10.6, 12, 13.8, 16.2, 19.5, 21.0, 24.5, 29.4, 32.7, 36.8, 42.3, 49.3, 56.0, 65.0, 74.0, 85.0, 99.0, 120, 150, 180, 215, 250, 285, 315, 350, 380 厘米

电枢直径小于 99 厘米时用整圆冲片，大于 99 厘米时用扇形片拼成。

当设计电机时，根据给定的 $\frac{P_N}{n_N}$ 值，可先从图 2-2 查得电枢外径最大值至最小值的范围。如果在这个范围内只有一个对应的标准直径，则就将它调整到标准值。如果在查得的电枢外径范围内有几个对应的标准直径，那末就要通过分析

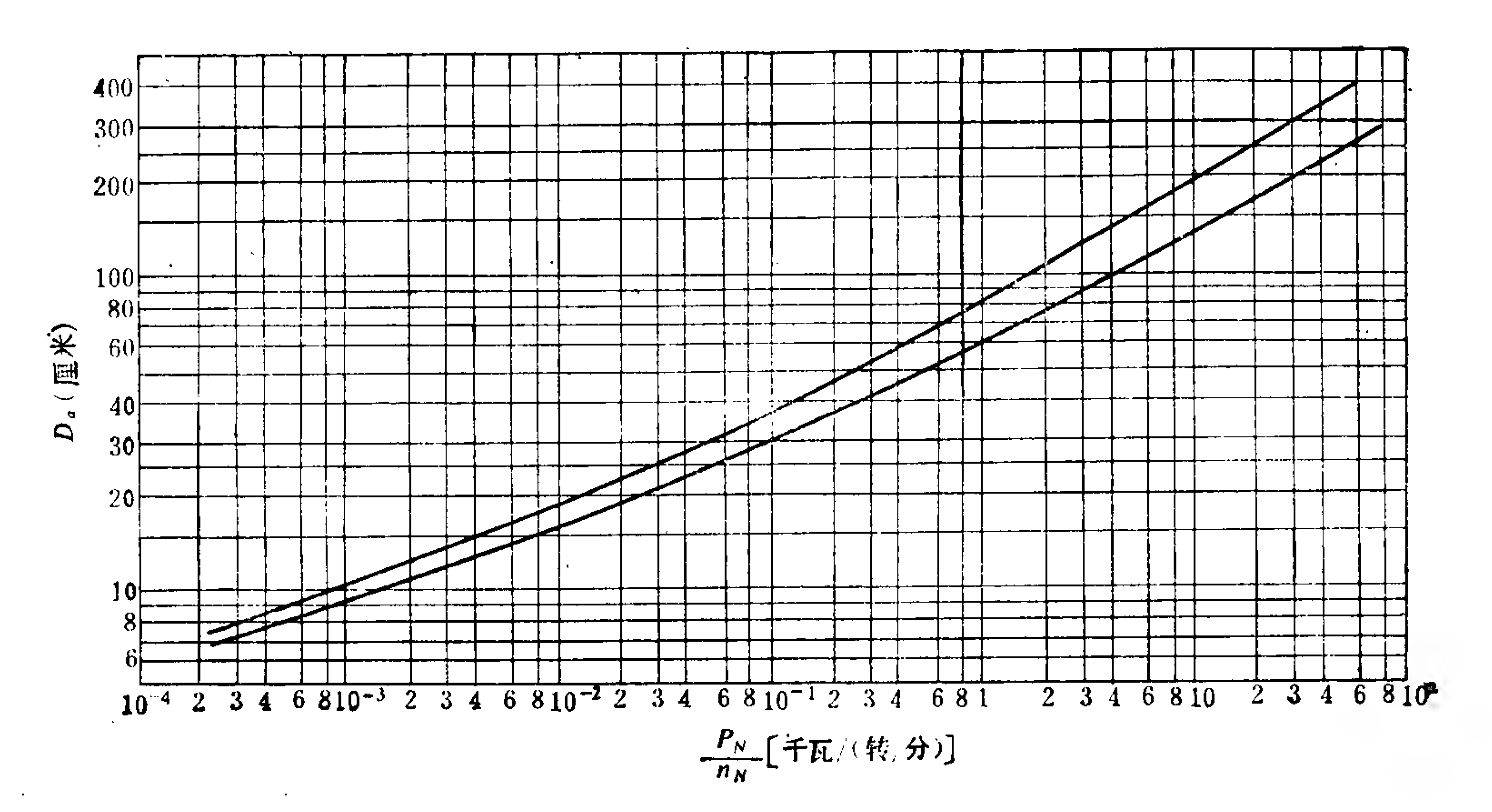


图 2-2 电枢外径 D_a 与单位转速输出功率 $\frac{P_N}{n_N}$ 的关系

或试算来确定其中最合适的一个。例如有一台直流电动机，$P_N=100$ 千瓦，$n_N=600$ 转/分，由公式 $\frac{P_N}{n_N}=\frac{100}{600}=0.167\ \frac{\text{千瓦}}{\text{转/分}}$，从图 2-2 的曲线查得 $D_a=35\sim43$ 厘米，与它相对应的标准直径有 36.8 与 42.3 厘米两种，这时就要研究分析，作出决择。如不易作出判断，则要进行两个直径方案的试算，加以比较，尤其要对换向和发热性能进行比较，然后决定取舍。

一般来说，在设计小型电动机以及低速中、大型电动机时，换向问题容易解决，为了减少电枢的转动惯量以提高电动机的机械动态性能，常选用较小的直径。在设计高速小型电机以及中、高速的中、大型电机时，换向问题比较突出，为了缩短其长度以减少电抗电动势，常用较大直径。

在设计系列电机时，对规格不同而 $\frac{P_N}{n_N}$ 比较接近的几种电机常选用一种电枢直径和不同的铁心长度与其对应，这时应按其中最大规格的电机在图 2-2 中选取曲线的下限值来确定电枢外径，这样才能使较小规格电机的电枢外径仍在曲线的范围之内。

考虑到机械强度、损耗及换向等综合因素，对于所选定的电枢直径，其圆周速度 v_a 通常不超过下列数值：

小型电机：$v_a\leqslant35\sim40$（米/秒）

中、大型电机：$v_a\leqslant55$（米/秒）

大型或高速直流电机在转动部件采取加固措施后，其最大圆周速度可放宽到 65～70 米/秒。

二、电磁负荷的选择

前已提到，电负荷 A 与磁负荷 B_δ 的选择与电机的主要尺寸直接有关。同时，A、B_δ 的数值与电机的运行性能和使

用寿命也有密切关系，因此必须全面考虑各方面因素，才能正确选择 A、B_δ 的数值。

一般来说，选用较高的磁负荷 B_δ 可以节约有效材料，缩小电机体积。但是 B_δ 过高会产生以下的一些不利影响：

1）将增加电枢铁芯的饱和程度，特别是电枢齿中的饱和更为强烈，于是空气隙及电枢磁路所需的励磁磁动势增高，从而增加励磁绕组的安匝数，即增加铜（铝）重；

2）将使电枢的铁耗增加（因为单位体积的铁耗近似地与铁内磁密的平方成正比），导致电机的效率降低，同时也使电机的温升增高。

同样，选用较高的电负荷 A 也可以节约有效材料，缩小电机体积。但是 A 过高会产生以下一些不利影响：

1）增加电抗电动势，使电机的换向性能恶化；

2）电枢反应的影响比较显著，导致工作特性变差。为了抑制电枢反应的影响，应增大空气隙，从而使励磁磁动势亦随之增加；

3）在电枢绕组电流密度不变的条件下，这将增加电枢槽内的导线，从而增加了电枢绕组的用铜量、铜耗和温升。

电机的电负荷 A 和磁负荷 B_δ 与电枢外径 D_a 有关，根据已生产电机的经验数据可以绘制成曲线，作为设计时参考。图 2-3 和图 2-4 分别表示 B 级绝缘直流电机的 A 与 B_δ 的经验值和 D_a 的关系。每一个 D_a 所对应的 A、B_δ 值都有一个上下限变化范围，要根据具体情况加以选取。

在选择 A 和 B_δ 值时，不宜都选得过高（如都选在曲线的上限）。提高 A、B_δ 值虽然可以使电机的体积缩小，节约材料的消耗和减少加工费用，但是铜耗、铁耗的相应增加和效率的降低，使电机在整个运行期间增加电能消耗。又由于损耗的

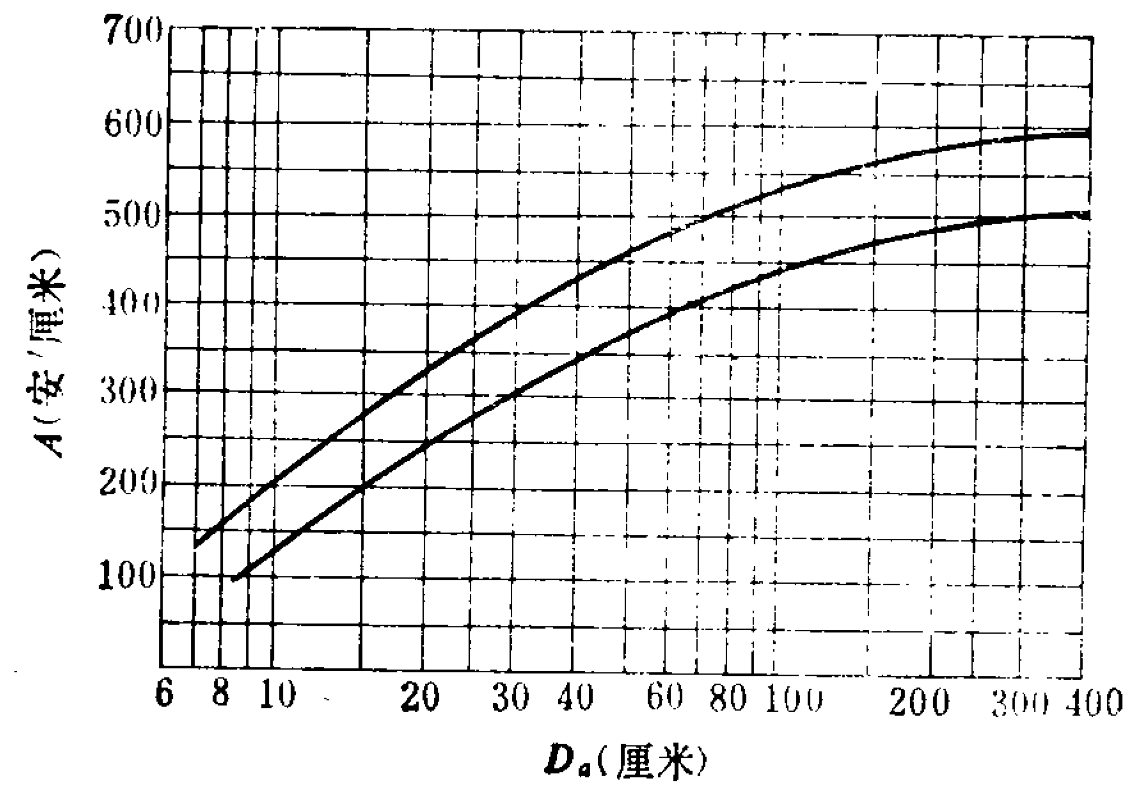


图 2-3 电负荷 A 与电枢直径 D_a 的关系

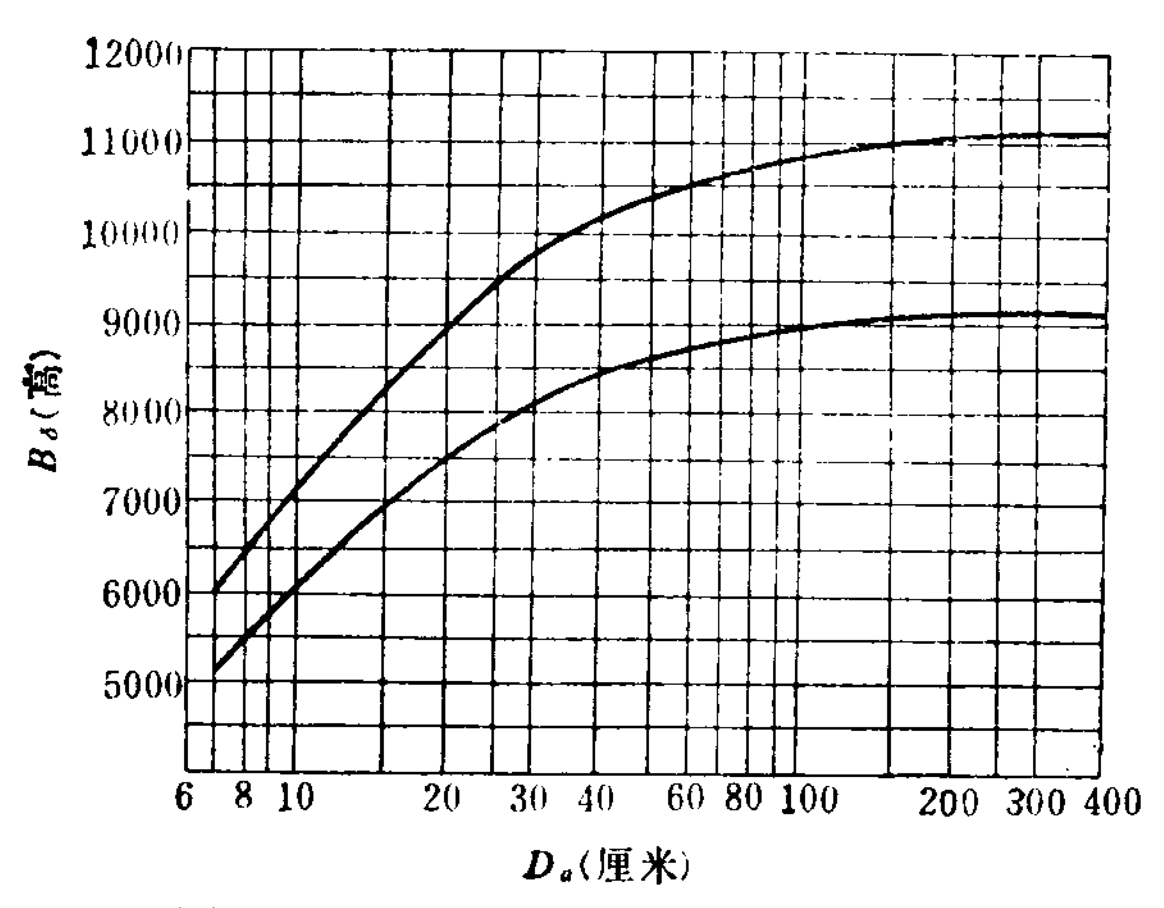


图 2-4 磁负荷 B_δ 与电枢直径 D_a 的关系

增加和散热面积的减少，使温升增高，绝缘材料加速老化，影响到电机的使用年限。同时，过高的 A、B_δ 对电机的工作特性和可靠性也有不利的影响。因此，选择适当的 A 和 B_δ 必须要根据国家的技术政策和使用部门的要求，综合考虑电机制造和运行的整个技术经济指标。

选择 A 和 B_δ 时，在 AB_δ 的乘积为一定的情况下，还应考虑 A 和 B_δ 间的比例关系。由于电机的电抗电动势正比于电负荷 A（见第四章），所以设计时一般常选用较小的 A 值和较大的 B_δ 值，以改善电机的换向性能；同时，A 的减小也使电枢的用铜量降低。A 与 B_δ 的比例关系与电机中铜、铁耗所占的比重也有密切的关系，对于低速电机，铁耗较小，B_δ 可选用较大值；对于高速电机，铁耗较大，B_δ 就不应选用较大的值。

在选择 A 和 B_δ 时，如果电机的结构使通风散热的条件较差（如封闭式电机），则 A 与 B_δ 值应低于图 2-3 和图 2-4 所示的范围。如果电枢绕组采用 F 级、H 级绝缘，则 A 值可高于图 2-3 所示的范围。

从图 2-3 和图 2-4 可以看出，当 D_a 增加时，A 和 B_δ 都随着有所增加。这是因为 D_a 增大后，通风散热的条件得到改善，槽面积和齿根截面都可以适当放大，再加上电枢导体截面的增大而使槽面积利用率提高，这就允许了 A 和 B_δ 可以适当提高。

应该指出：图 2-3 和图 2-4 所表示的电磁负荷 A、B_δ 值是代表了当前电机设计的水平，这些数值比过去电机设计教科书上的推荐值要大一些，这是生产技术的进步和材料性能的改善所取得的结果。为了要缩小电机的体积，又要保持良好的性能指标，提高 A、B_δ 值的同时必须要有相应的措施。例如：

(1) 电负荷 A 的提高表示电枢槽内导线的增加，磁负荷 B_δ 的提高表示通过电枢齿部磁通的增加，这些将分别引起电枢槽面积和齿截面的不够。通过采用薄型绝缘材料和适当提高电流密度以缩小槽面积，从而留出足够的齿截面，这有可能补偿上面的不足；

(2) 磁负荷 B_δ 的提高，将引起铁耗和励磁磁动势的增

加。如果采用高导磁性能和低损耗的导磁材料，就会消除上面的不利后果；

(3) 电磁负荷的提高使电枢尺寸缩小后，电枢表面单位面积所散逸的损耗将增高，从而增加温升。这是因为电枢表面每单位面积的铜耗正比于电负荷 A，推导如下电枢绕组有效长度部分的铜耗为

$$P'_{\mathrm{Cu}\,a}=N_a i_a^2 r=N_a\left(\frac{I_a}{2a}\right)^2\rho\frac{l}{A_{\mathrm{Cu}\,a}}$$

式中 r——每根导体在槽内部分的电阻(欧)，而 $r=\rho\dfrac{l}{A_{\mathrm{Cu}\,a}}$；

i_a——每根导体的电流(安)，而 $i_a=\dfrac{I_a}{2a}$；

ρ——导体的电阻率(欧·毫米²/厘米)；

$A_{\mathrm{Cu}a}$——导体截面积(毫米²)；

l——导体在槽部的长度(厘米)，而 $l=l_a$。

每单位电枢表面的铜耗是

$$\frac{P'_{\mathrm{Cu}\,a}}{\pi D_a l_a}=\frac{N_a\left(\frac{I_a}{2a}\right)}{\pi D_a}\frac{\left(\frac{I_a}{2a}\right)\rho l}{A_{\mathrm{Cu}\,a}l_a}=AJ_a\rho$$

式中 J_a——电枢导体的电流密度(安/厘米²)，而 $J_a=\dfrac{\left(\frac{I_a}{2a}\right)}{A_{\mathrm{Cu}a}}=\dfrac{i_a}{A_{\mathrm{Cu}\,a}}$。同时，电枢表面每单位面积的铁耗因磁负荷的提高而加大。因此就要求设计更为合理的电机几何尺寸，改进电机结构，加强通风冷却条件，改善浸漆工艺以提高热的传导以及采用耐高温的绝缘材料等作为相应的措施。

现有产品的 A 和 B_δ 的最高数值，并不是电磁负荷的最高限度。随着电工材料的不断改进，通风冷却系统的改善和生产技术的发展，直流电机的电磁负荷还会逐步提高。因此，

电机设计必须从当时的实际生产条件出发，综合进行分析和比较，以选择合理的电磁负荷数值。

三、电枢计算长度 l_δ 的确定

从式(2-11)，可以得到电枢计算长度 l_δ 的表达式为

$$l_\delta=\frac{6.1\times10^{11}}{\alpha'_p B_\delta A D_a^2}\frac{P_{em}}{n_N} \quad （厘米） \qquad (2-13)$$

上式中，电磁功率 P_{em} 可根据给定的额定功率 P_N 按式(2-12)得到；额定转速 n_N 是技术条件给定的；电枢外径 D_a 是根据图 2-2 选定(调整到标准直径)；电磁负荷 A、B_δ 按图 2-3 和 2-4 选定；计算极弧系数 α'_p 可根据图 2-5 选取。这样就可以算得电枢计算长度 l_δ。

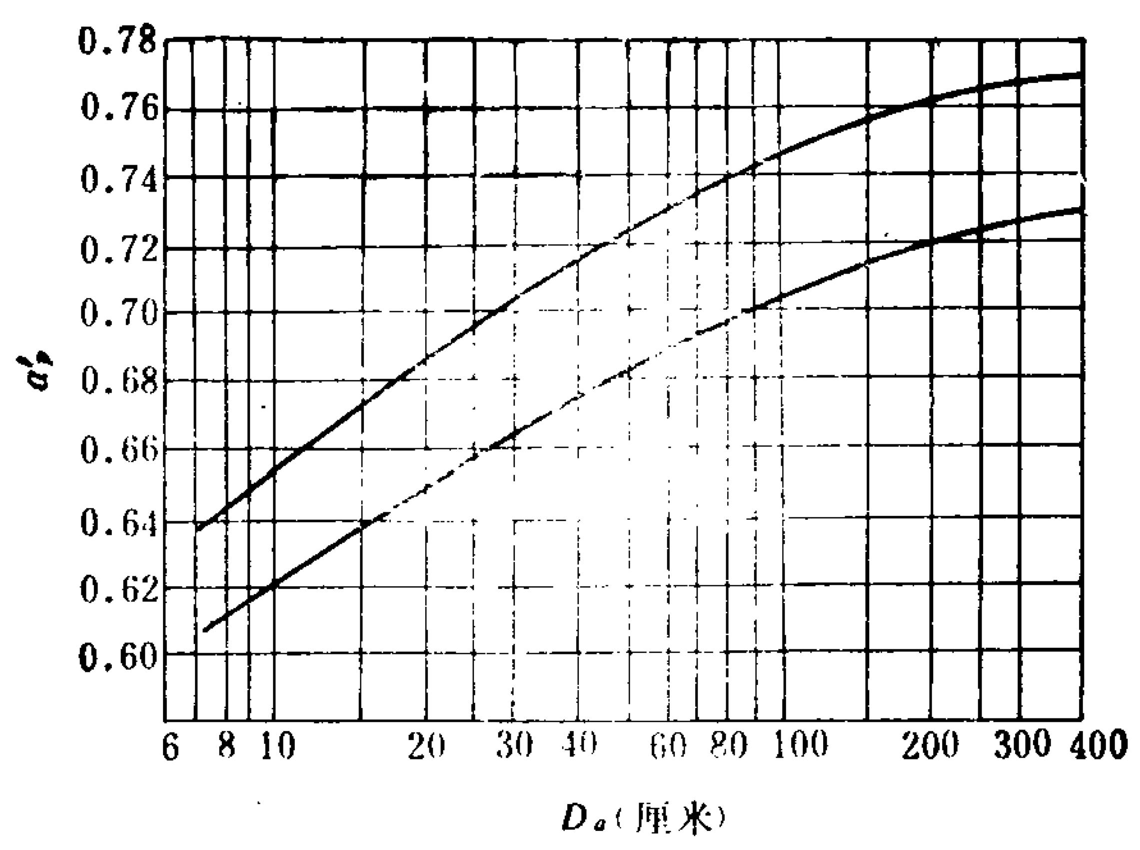


图 2-5 计算极弧系数 α'_p 与电枢外径 D_a 的关系

计算极弧系数 α'_p 的表达式见式(2-5a)与(2-5b)。它的值取得大一些对缩小电机的主要尺寸是有利的，但两极间的空间因之而变窄，磁极漏磁增大，影响换向。小电机的极间距离已经较短，其 α'_p 值应较小。对于同一电枢外径的电机，极数多时极间距离小，α'_p 应选得小一些；极数少时，α'_p 可选大些。

四、电枢长度与直径的比值 λ

从式(2-11)可以看出，在同样给定条件和选定的 A、B_δ 和 α'_p 数值下，$D_a^2 l_\delta$ 是一定的。因此，如果把 D_a 选得大一些，l_δ 必定小一些，电机就比较短粗；反之，如果把 D_a 选得小一些，l_δ 必定大一些，电机就比较细长。电机的这个几何形状关系可用电机计算长度与电枢外径的比值

$$\lambda=\frac{l_\delta}{D_a} \tag{2-14}$$

来表示。λ 的大小对电机的性能指标和经济指标是有影响的。当 λ 值较大时，说明电机比较细长，电枢绕组的端部长度占整个绕组的比例较小，因此绕组端部的用铜量较省，相应地，端盖等结构也较轻，从而可使单位功率的材料用量减少；在相同的电流密度下，电枢铜耗有所降低，因此效率有所提高；电机的转动惯量较小，有利于电动机的起动和调速；电机内部通风条件变差，使电枢绕组温升沿铁心长度分布不均匀，使最热点的温升提高；电抗电动势增加，对换向不利；铁心冲片的数目增多，从而增加冲剪迭压的制造工作量。反之，当 λ 较小时，说明电机比较粗短，其特点正好与 λ 值较大的情况相反。一般来说，对于小型电机，因换向问题不突出，λ 值可较大；而对中、大型电机和高速电机，换向比较困难，λ 值要较小。

为了全面权衡电机的性能指标和经济指标，根据生产经验，λ 有一定的范围。图 2-6 表示不同 D_a 时 λ 的经验值范围。从式(2-13)计算出来的 l_δ 和选定的 D_a，应该核对其 λ 值是否在经验值范围之内。如果比值 λ 超过了经验范围，一般来说，应该重新选取 D_a 和计算 l_δ，使其符合以上要求。

对中、大型电机，从换向性能、通风发热、机械强度和工艺等方面考虑，其最大电枢长度与直径的关系还可用下式表示

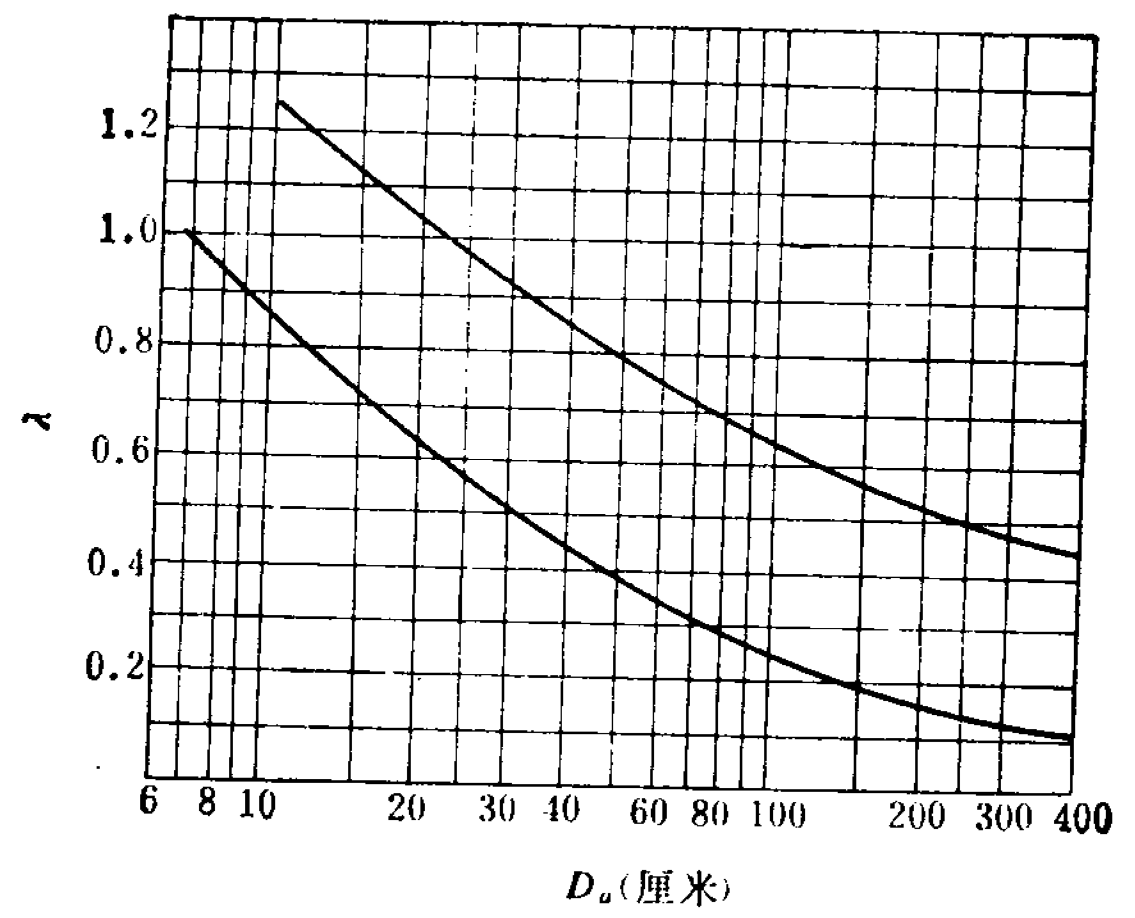


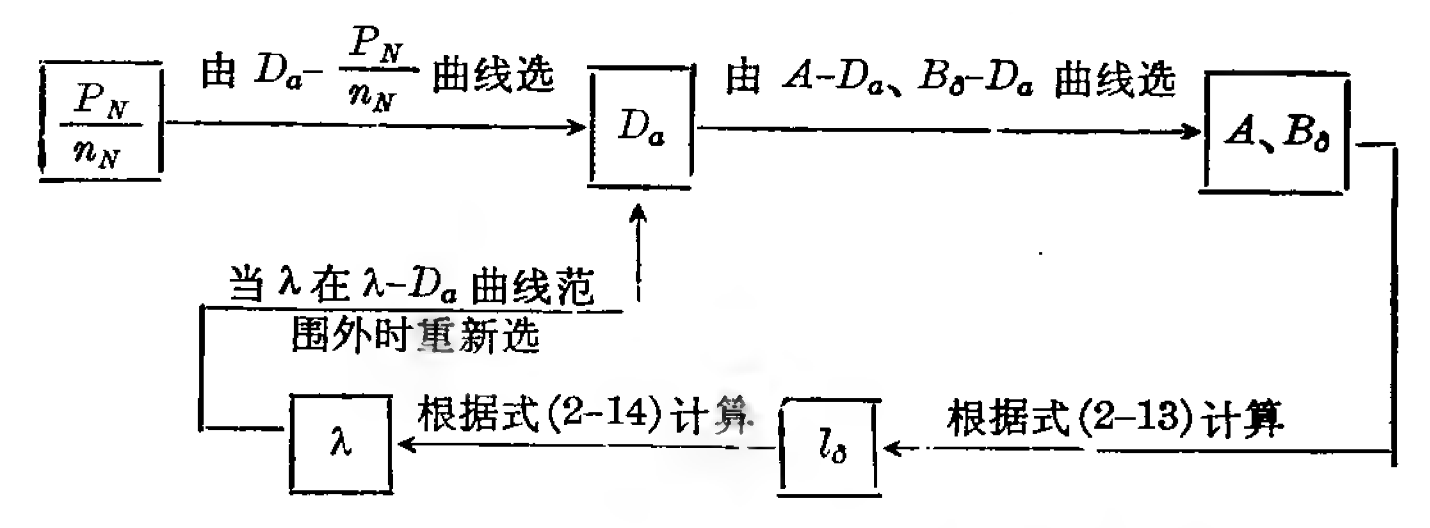
图 2-6 λ与电枢外径 D_a 的关系

$$l_{\delta\,max} < (65 + 0.4D_a) \quad (\text{厘米}) \qquad (2\text{-}15)$$

但 $D_a > 250$ 厘米时，应使

$$l_{\delta\,max} < 170 \quad (\text{厘米})$$

总结以上分析，选择电机主要尺寸的步骤可用下面的示意图简明地表示



有了 l_δ 后，根据式(2-3)可以得到电枢铁心的实际长度 l_a。为了制造上的方便，电枢长度一般要求调整到整数或工厂所规定的标准长度。

应该指出：上面所介绍的选择电机主要尺寸的方法不是

唯一的。有时可以这样来考虑：式(2-11)也可以写成 $D_a^2 l_\delta = C_A \frac{P_{em}}{n_N}$，用 $l_\delta = \lambda D_a$ 的关系代 λ，可得 $D_a = \sqrt[3]{C_A \frac{P_{em}}{n_N} \frac{1}{\lambda}}$，如果根据生产经验作出曲线能够查得 C_A 和 λ，那末就可以算出 D_a 和相应的 l_δ。有时也可以凭生产经验直接写出标准电枢外径和工厂规定的标准长度。

同时也应该说明：对于给定额定值和技术要求的电机，它的主要尺寸的数值并不是唯一的。有时有几种主要尺寸的方案都可以满足要求，这就需要详细加以分析比较，从使用和制造两方面来权衡，才能作最后的取舍。

系列设计中，前已提到，对于规格不同而 $\frac{P_N}{n_N}$ 比较接近的几种电机，是用同一个电枢外径 D_a 和几种不同的标准长度来与其适应，这是为了扩大零部件的通用性，使生产加工方便，降低成本。但也应该看到有些规格的电机不得不因此而放弃它们最适宜的尺寸。

2-3 极数的选择

选择极数应综合考虑运行性能和经济指标。设计电机时，有时要选取几种极数进行方案比较，才能确定合适的极数。

根据式(2-2)和(2-8)，可得到 $2p\phi = \pi\alpha_p' B_\delta l_\delta D_a$，在电枢外径、长度和气隙磁通密度确定后，沿电枢圆周的总磁通 $2p\Phi$ 为一定值。增加极数，可减少每极磁通，电枢轭及机座的截面可相应减小，从而减少电机的用铁量；电枢绕组的端接部分将随极数增加（即极距减小）而缩短，在同样的电流密度下，绕组用铜量也将减少；换向器上的刷杆数将随极数的增加而相应地增加，每一刷杆上的电刷数可以减少，从而换向器长度可缩短；磁极增多后，电枢电感相应减少（见第七章），这将有利于

换向，但是当可控硅整流电源供电时，不利于抑制谐波电流。一般来说，增加极数可以节约原材料和缩小电机外形。

同时，当极数增加后，会使磁极及励磁线圈的数目增多，从而增加了制造工时；随着极数的增加，考虑到极漏磁不能太大，极弧系数 α_p 要减小，从而使电机原材料的利用率变差；磁极增加后，一定要增加换向器的换向片数，使相邻换向片间的电压仍在一定的限额以下，以防止环火；电枢中磁通的交变频率将随极数的增加而增加，因而齿的铁损耗随极数的增加而增大，而电枢轭的铁损耗则增加很少，因为铁轭的重量反比于极数而下降；当电流密度不变时，电枢绕组中的铜耗随极数的增加因铜重减少而降低，但是励磁绕组的铜耗因励磁线圈数的增多而上升。一般说，电机效率随极数的增加而有所下降。

一般直流电机的极数选择可参考图 2-7，我国生产的直流电机的常用极数如表 2-1。

直流电机的极距 τ 的常用范围如下：

中小型电机　　$\tau=12\sim50$ 厘米

大型电机　　$\tau=45\sim70$ 厘米

额定电压较高的电机常用较少的极数，以防止换向器片间的电压过高。而低电压大电流的发电机常选用较多的极数，使每刷杆的电流不超过 1000～1200 安。

以上研究了确定直流电机的主要尺寸和极数所考虑的有关因素以及对电机性能指标和经济指标的影响，为进行设计时选择主要尺寸和分析、调整方案提供了理论依据。但是在生产实践中，如果对直流电机的制造已经积累了丰富的实践经验，一般可不必按这样的步骤进行计算。通常是采用类比的方法，即根据所设计电机的技术条件参考已生产的同类型相近规格的电机尺寸，直接初选某个电枢外径和长度；如果

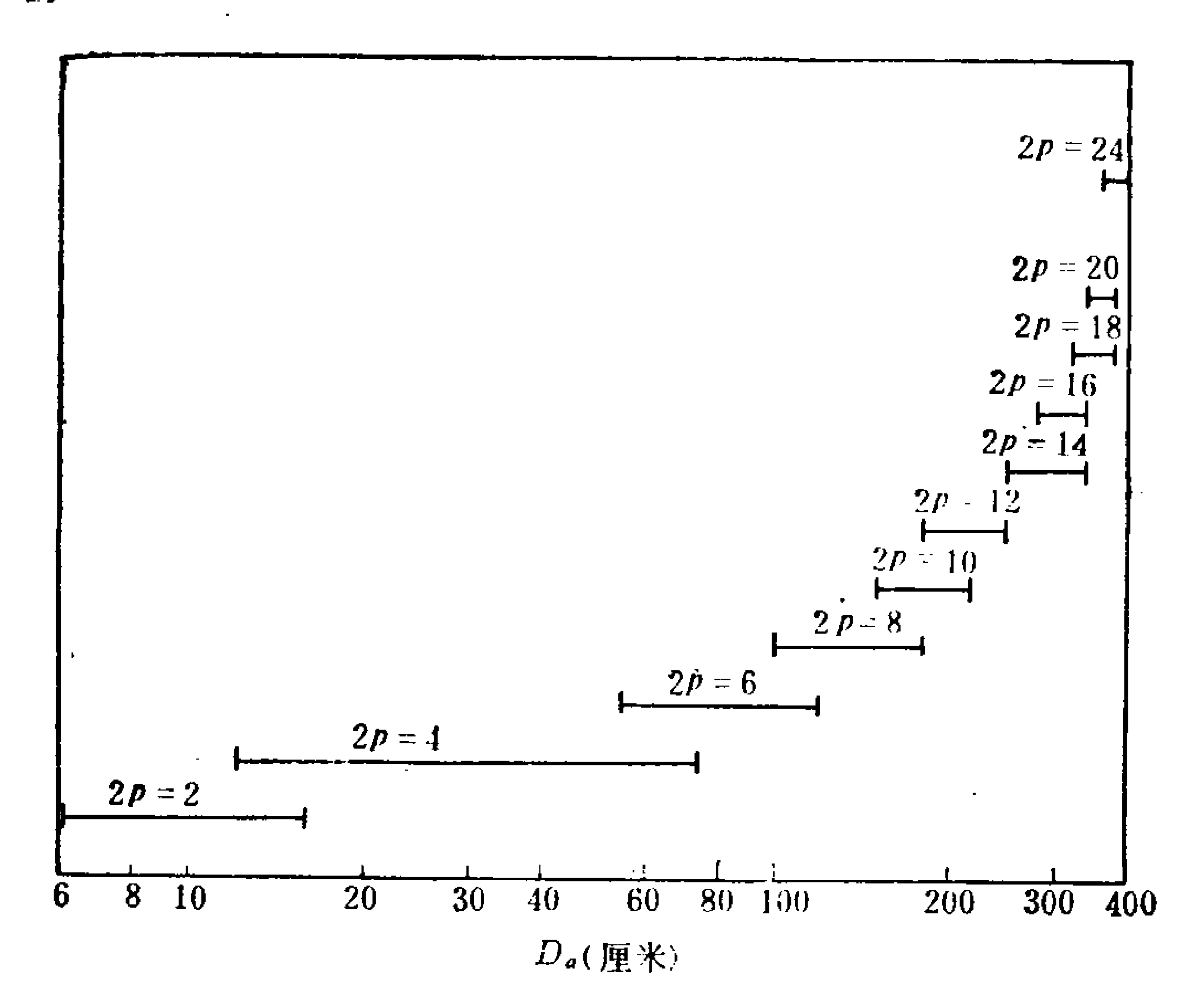


图 2-7 极数 $2p$ 与电枢外径 D_a 的关系

表 2-1 直流电机常用的极数

电枢直径 D_a(cm)	7～12	13.8～56	65～120	150	180
极数 $2p$	2	4	6	8	8～10
电枢直径 D_a(cm)	215	250	285	315	350～380
极数 $2p$	10	12	14	16～18	18～24

$\frac{P_{em}}{n_N}$不同，按式(2-11)知 $D_a^2 l_\delta \propto \frac{P_{em}}{n_N}$，因此可按比例确定 D_a 和 l_δ。确定了 D_a 之后，极数一般可随之而定。此外，借助于原有电机温升试验的结果和工作特性试验的数据，参照本次设计中将要采取的改进措施，还可以对电机的主要尺寸和极数进行适当调整。

第三章　电 枢 设 计

直流电机的电枢包括电枢绕组、电枢冲片和换向器，它们的设计计算包括电枢绕组各种数据的确定，电枢绕组绝缘材料的选用以及电枢冲片、换向器的各种尺寸计算等，下面将分别说明。

3-1　电枢绕组的型式及其选择

一、电枢绕组概述

直流电机的电枢绕组由许多线圈组成，每个线圈的两端分别与两个换向片相联，这样的线圈称为绕组元件。线圈安放在电枢槽内，一个槽内一般有几个线圈，组成线圈组。槽内的线圈边分上、下两层叠置，做成双层绕组。线圈与换向片之间以及绕组元件之间按照一定的规律联接起来，按绕组元件循行，形成闭合回路。在换向器上安置电刷后，由绕组元件组成闭合回路即被正、负极性的电刷分成若干对并联支路，并通过电刷与外电路相联。电刷安放的位置应使各支路感应的电动势和产生的电磁转矩获得最大。

绕组的基本数据说明如下(关于它们的选取或计算见本节和下节)：

Z——电枢槽数；

u——每槽每层并列的元件边数，也称为虚槽数，通常可取为1～5。当$u>1$时，并列的元件可布置为同槽式或异槽式，如图3-1所示；

S——电枢绕组元件总数，

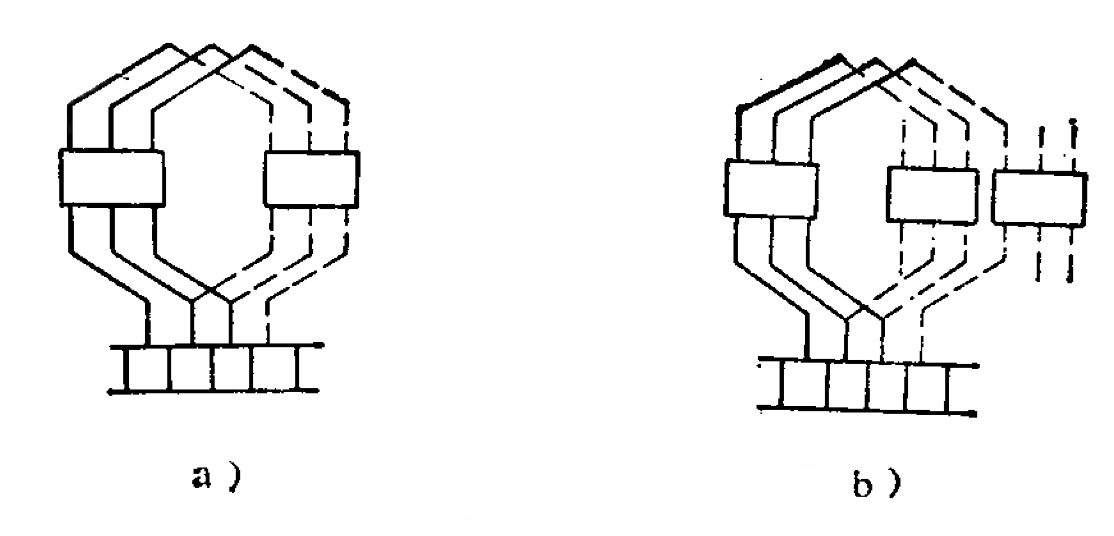


图 3-1 元件在槽内的布置

a) 同槽式 b) 异槽式

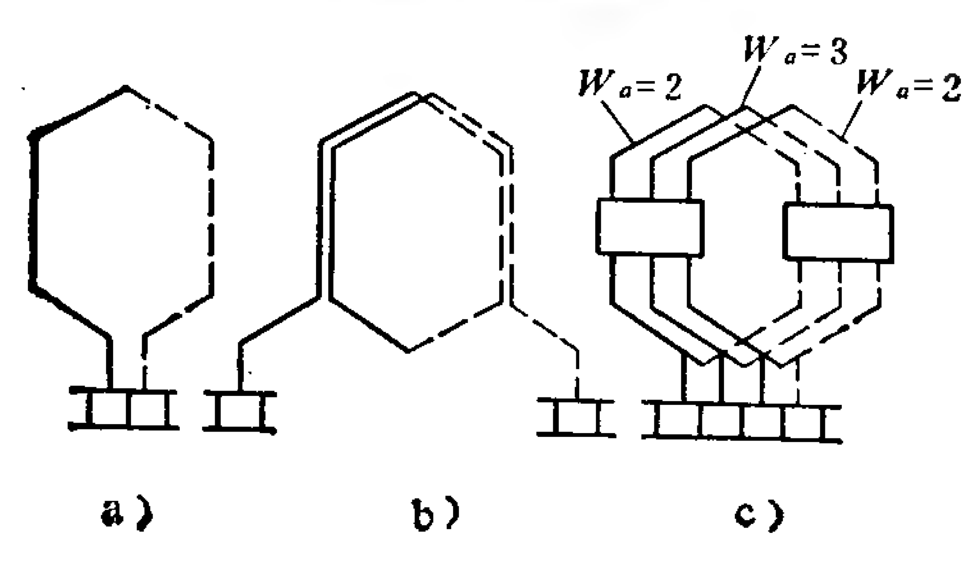


图 3-2 单匝、多匝和分数匝元件

a) $W_a=1$ b) $W_a=2$ c) $W_a=\frac{7}{3}$

$$S=Zu \tag{3-1}$$

K——换向器片总数，

$$K=S \tag{3-2}$$

W_a——每个元件的匝数，它可以是单匝、多匝或分数匝，如图 3-2 所示；

N_a——电枢绕组总导体数，

$$N_a=2W_aS \tag{3-3}$$

y_s——槽节距，用槽数表示，

$$y_s=\frac{Z}{2p}\mp\varepsilon_s \tag{3-4}$$

其中　$0 \leqslant \varepsilon_s < 1$，$\varepsilon_s = 0$ 时称为整距绕组，$\varepsilon_s \neq 0$ 而在其前取“－”号称为短距绕组，取“＋”号称为长距绕组；

y_1——第一节距，折算成换向片数来表示，

$$y_1 = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon_K \tag{3-5}$$

其中　$\varepsilon_K = u\varepsilon_s$；

y_K——换向器节距，为一个元件的两端接在换向器片上的跨距，用换向片数表示；

y——合成节距，为两个串联元件的对应边在电枢圆周上的距离，折算成换向片数表示；

y_2——第二节距，为接在同一换向片上的两个元件边在电枢圆周上的跨距，折算成换向片数表示；

a——电枢绕组的并联支路对数；

m——复倍系数；

t_K——换向器片距，

$$t_K = \frac{\pi D_K}{K} \quad (\text{厘米}) \tag{3-6}$$

其中，D_K 为换向器的外径(厘米)。不同类型绕组的各种节距如图 3-3 所示，图中下角 L 示叠绕组，W 示波绕组。

二、绕组的各种型式及其特点

按照线圈端头与换向片之间以及元件之间的不同联接规律，电枢绕组可分为叠绕组、波绕组和蛙绕组(即混合绕组)。叠绕、波绕、蛙绕三类绕组分别有单叠和复叠、单波和复波，单蛙和复蛙之分；其中单叠绕组和单波绕组是最基本的类型。不同类型绕组的区别在于它们的并联支路数不同，不同的并联支路数在一定程度上反映了电枢电流的大小。

叠绕组、波绕组和蛙绕组的绕组展开见图 3-4。它们的

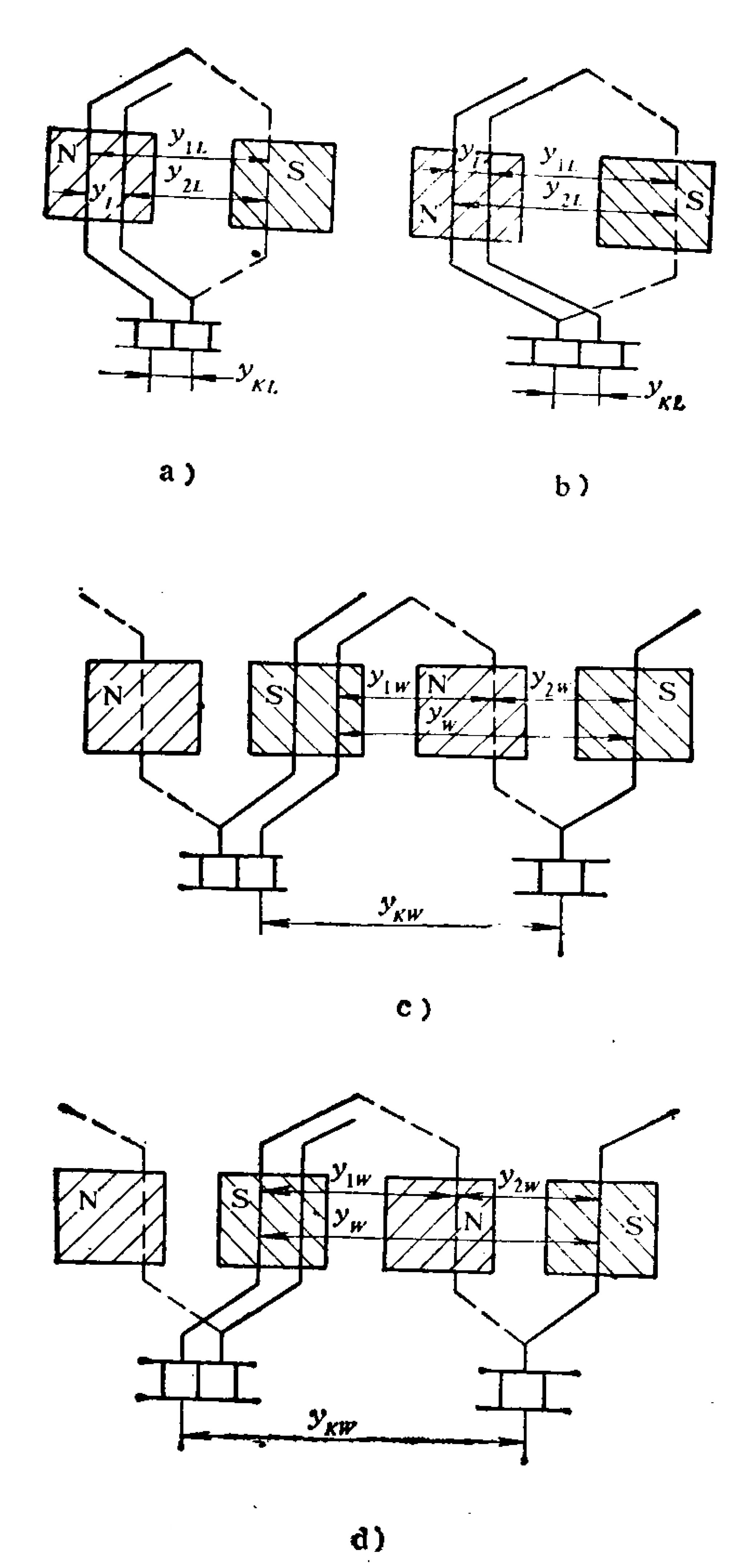
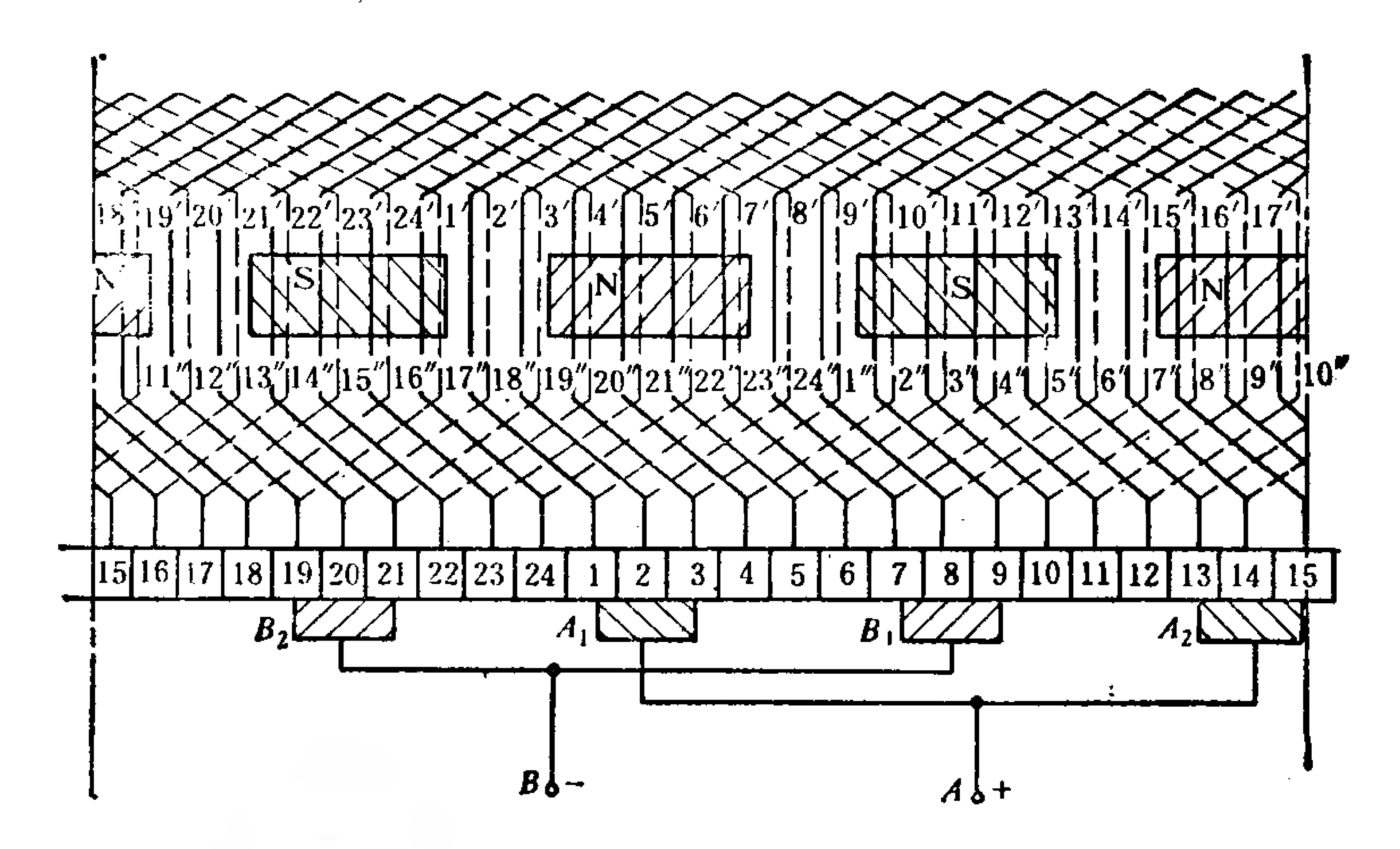


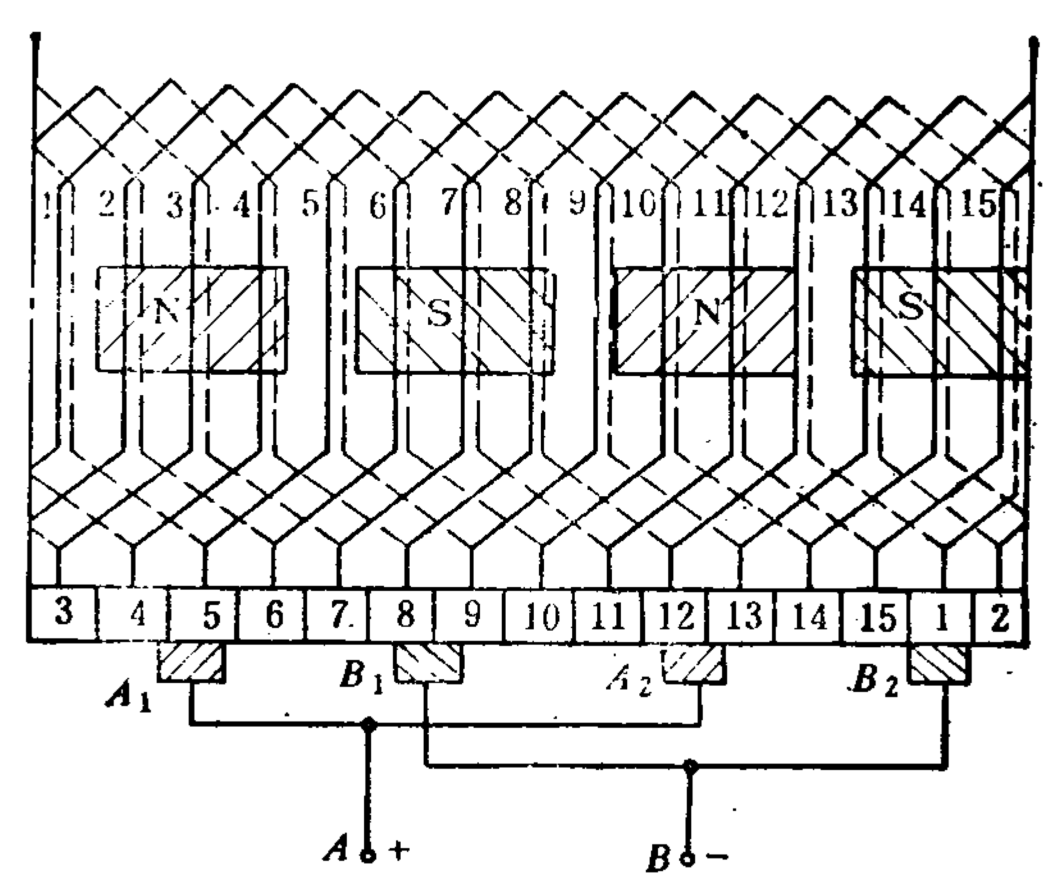
图 3-3　不同类型绕组的节距

a）叠绕开口式　b）叠绕交叉式　c）波绕开口式　d）波绕交叉式

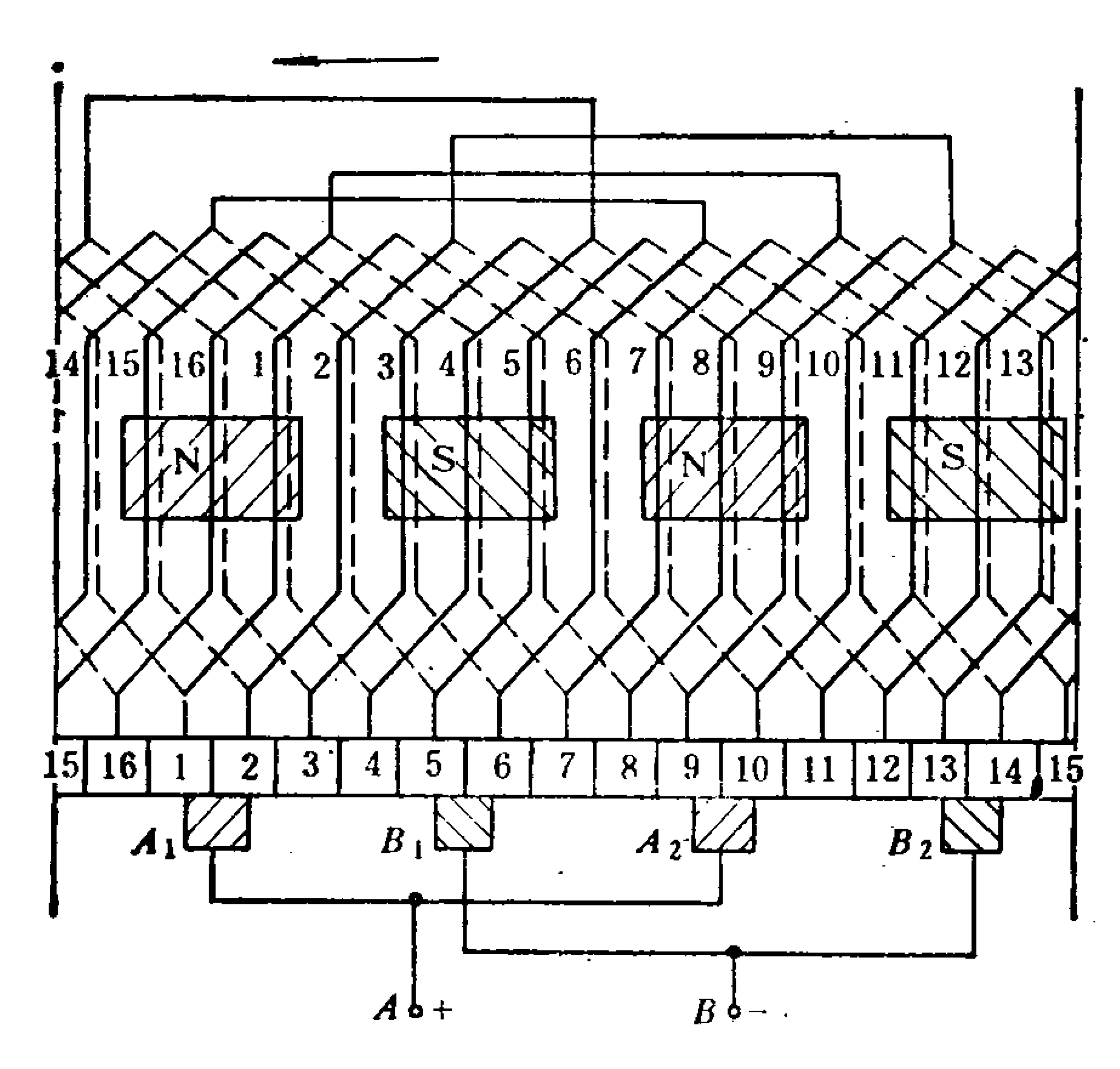
a) 单叠绕组 $2p=4$, $m_L=1$, $2a=4$, $S=K=Z=16$, $u=1$,
$y_1=4$, $y_2=3$, $y_K=1$, $W_a=1$, $t=1$



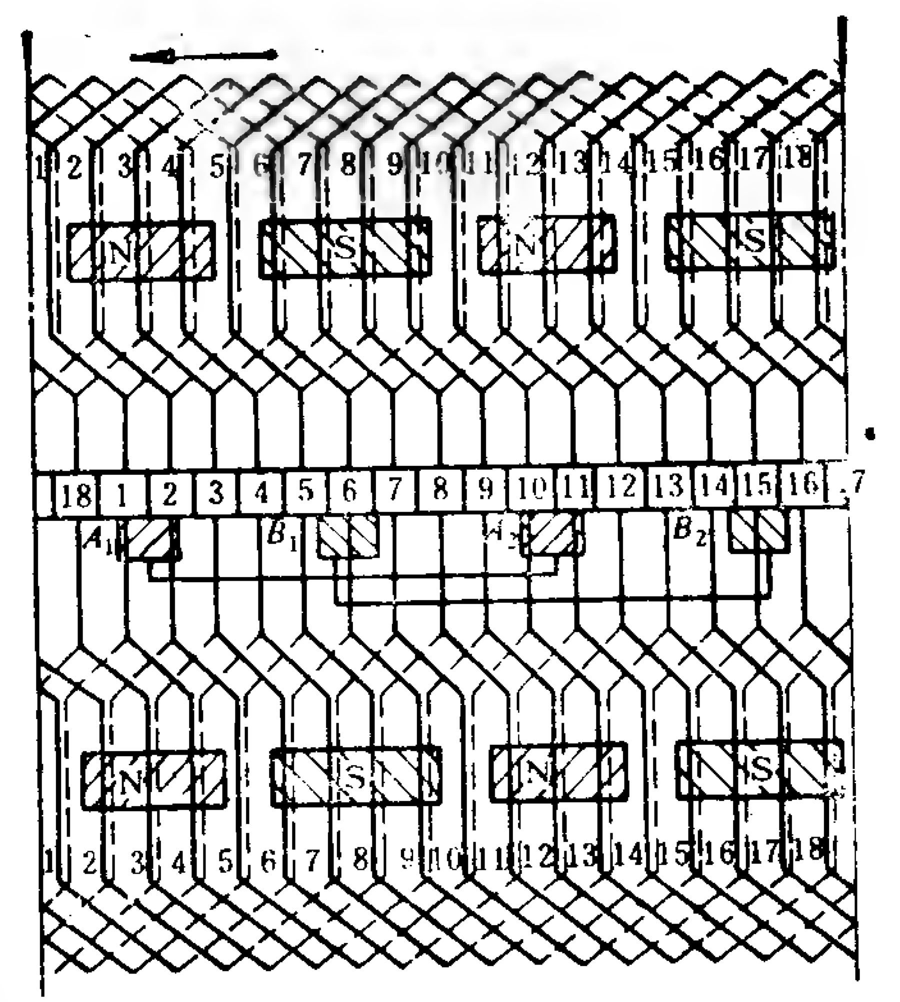
b) 双叠绕组 $2p=4$, $m_L=2$, $2a=8$, $S=K=Z=24$, $u=1$,
$y_1=7$, $y_2=5$, $y_K=2$, $W_a=1$, $t=2$



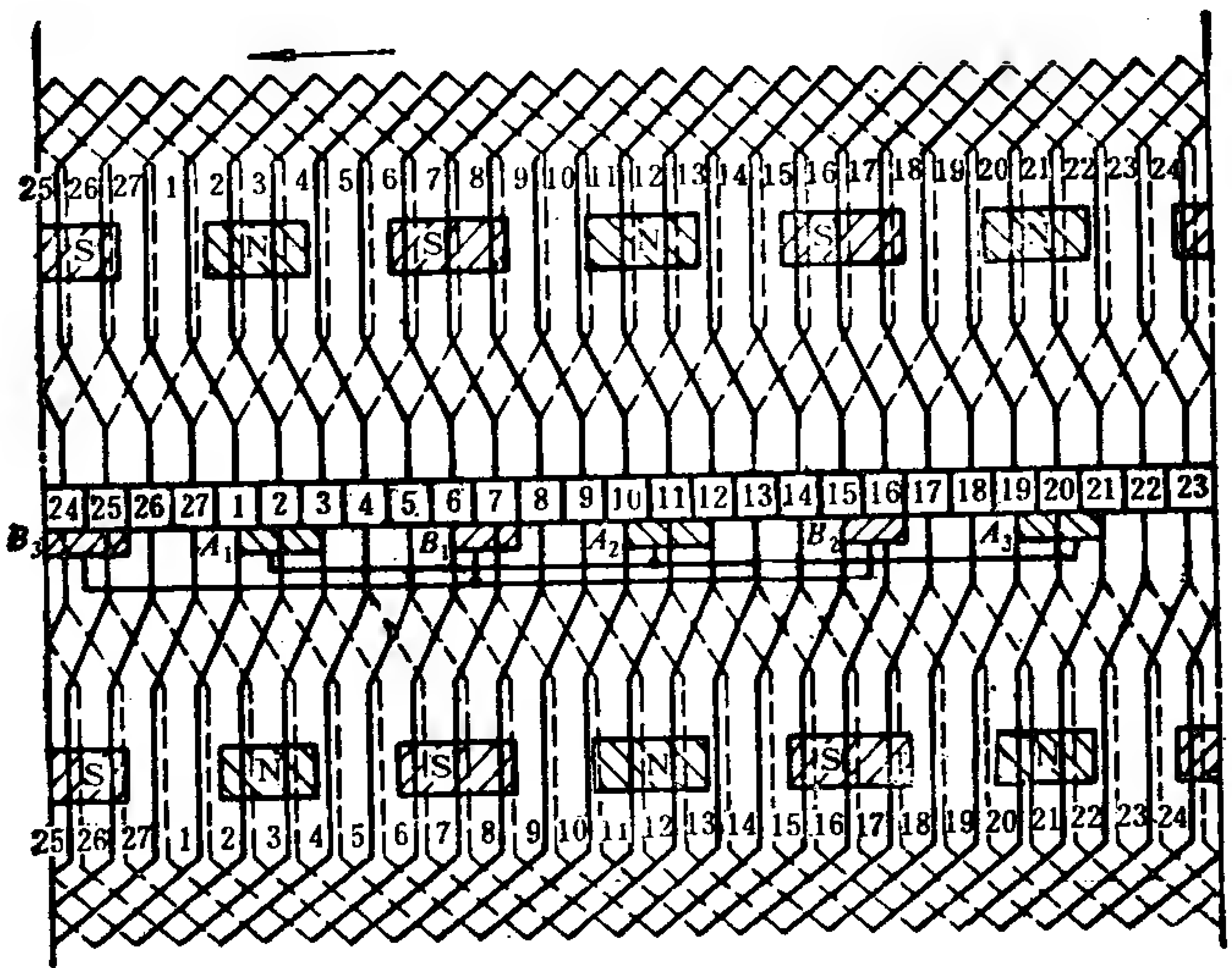
c) 单波绕组 $2p=4$, $m_W=1$, $2a=2$, $S=K=Z=15$, $u=1$, $y_1=3$, $y_2=4$, $y_K=7$, $W_a=1$, $t=1$



d) 双波绕组 $2p=4$, $m_W=2$, $2a=2$, $S=K=Z=16$, $u=1$, $y_1=4$, $y_2=3$, $y_K=7$, $W_a=1$, $t=1$



e) 单蛙绕组 $2p=4$, $2a=8$, $S=K=Z=18$, $u=1$, $m_L=1$, $y_{1L}=4$, $y_{2L}=3$, $y_{KL}=1$, $m_W=2$, $y_{1W}=5$, $y_{2W}=3$, $y_{KW}=8$, $W_a=1$



f) 双蛙绕组 $2p=6$, $2a=24$, $S=K=Z=27$, $u=1$, $m_L=2$, $y_{1L}=4$, $y_{2L}=2$, $y_{KL}=2$, $m_W=6$, $y_{1W}=5$, $y_{2W}=2$, $y_{KW}=7$, $W_a=1$

图 3-4 绕组展开图

表 3-1 叠绕组、波绕组和蛙绕组的主要特点

绕组型式	叠绕组		波绕组		蛙绕组	
	单	复	单	复	单	复
复倍系数	$m_L=1$	$m_L=2,3,\cdots$	$m_W=1$	$m_W=2,3,\cdots$	$m_L=1,\ m_W=p$	$m_L=2,3,\cdots,m_W=pm_L$
绕组联接规律	组成一条支路的各个串联元件彼此前后相叠，各元件的对应边处于同一主磁极下		组成一条支路的各个串联元件呈波浪形伸展，各元件的对应边处于所有相同极性的主磁极下		元件数相等的一套叠绕组和一套波绕组嵌在共同的槽中，接到共同的换向片上，但要求叠、波绕组的支路数相等，相隔 $\frac{K}{p}$ 个换向片的等位点之间有一个叠绕组元件和一个波绕组元件联起来，等效于均压线	
并联支路数	$2a=2m_Lp$		$2a=2m_W$		$2a=2m_Lp+2m_W=4pm_L$	
节距	$y_1=\frac{K}{2p}\mp\varepsilon_K$ $y=y_K=\pm m_L$ $y_2=y_1-y$		$y_1=\frac{K}{2p}\mp\varepsilon_K$ $y=y_K=\frac{K\mp m_W}{p}$ $y_2=y-y_1$		$y_{1L}=\frac{K}{2p}\mp\varepsilon_K$，$y_{1W}=\frac{K}{2p}\pm\varepsilon_K$，即$y_{1W}+y_{1L}=\frac{K}{p}$ $y_{KL}=\pm m_L$，$y_{KW}=\frac{K\mp m_W}{p}=\frac{K}{p}\mp m$，即 $y_{KL}+y_{KW}=\frac{K}{p}$ $y_{2L}=y_{1L}-y_{KL}=y_{2W}=y_{KW}-y_{1W}$	
电刷宽度	$b_b>m_Lt_K$		$b_b>m_Wt_K$		$b_b>m_Wt_K$	
刷杆数	$n_b=2p$		$n_b=2p$ 但也可以只用一对刷杆		$n_b=2p$	
闭路数	闭路数为换向片数 K 与 y_K 的最大公约数，$t=1$ 称单闭路绕组，$t=2$ 为双闭路绕组，余类推				t_L 或 t_W 分别为换向片数 K 与 y_{KL} 或 y_{KW} 的最大公约数	
电刷位置	电刷放在通过换向器和处在中性区域的元件边相联					

特点见表 3-1。

三、对称条件

直流电机的电枢绕组是多支路的并联电路，为使电机空载时绕组内部无环流和负载时并联支路的电流均匀分配，绕组各对支路的元件数应相等，其对应的元件或元件边应处于相同的磁极下位置，则在磁场对称分布和电刷接触良好的情况下运行时，绕组并联支路具有相同的电动势和电流。符合上述条件的绕组称为对称绕组。

电枢绕组的对称条件是

$$\frac{S}{a}=\text{整数} \tag{3-7}$$

$$\frac{Z}{a}=\text{整数} \tag{3-8}$$

$$\frac{p}{a}=\text{整数} \tag{3-9}$$

第一个条件是说，各对支路都串联着 $\frac{S}{a}$ 个元件，其数量相等，由于元件按一定的规律联接，所以分布是一一对应的。第二个条件是说，考虑到 $u>1$ 的情况下，这些元件在槽中的分布也一一对应，从而各对支路对应的元件处于相同的磁场情况，它们的电位相等。第三个条件主要是对复波绕组而言，因为复波绕组的 a 对支路中，相应元件的某一等电位点有 a 个，这 a 个等电位点是均匀分布的，必须在磁场中处于相同的情况，也即它们彼此相隔 1、2、3 或任意整数个双极距，因此 $\frac{K}{a}$ 应等于 $\frac{K}{p}$ 或 $\frac{K}{p}$ 的整倍数，这样就得到 $\frac{p}{a}=$ 整数。

四、均压线

对称绕组只有在外部条件对称的情况下才能获得满意的

运行。如果磁场分布不对称,对叠绕组而言,仍然会产生负载时各支路中的电流不均匀分配,从而增加电枢绕组铜耗。如果电刷的接触电阻不等,对复绕组而言,也会产生负载时各支路中的电流不均匀分配,增加电枢铜耗,同时也会引起换向片上的电位分布不均匀,可能导致换向困难。解决这些问题的措施是联接均压线。所谓均压线,就是在绕组中把等电位点联接起来的导线。

对于单叠绕组,由于磁场的不对称分布,可能造成各支路的感应电动势不等,联了均压线之后,产生均压电流,可以使电机的磁场趋于恢复对称,从而达到各支路的电流分配接近均匀。这种均压线一般称为甲种均压线。单叠绕组有 p 对支路,相应元件的某一等电位点有 p 个,它们彼此相隔 2 个极距,所以联接均压线的均压线节距是

$$y_{eqK}=\frac{K}{p} \tag{3-10}$$

在 $u>1$ 的情况下,要使对应的元件都处于相同的磁场情况,能够联接均压线的条件显然是

$$y_{eqK}=\frac{K}{p}=\text{整数}$$

$$\frac{y_{eqK}}{u}=\frac{\frac{K}{p}}{u}=\frac{\frac{K}{u}}{p}=\frac{Z}{p}=\text{整数}$$

由于单叠绕组 $a=p$,上面的两个式子就是式(3-7)和(3-8)。

对于单波绕组,由于要满足 $y_K=\frac{K\mp1}{p}=\text{整数}$,在 $p>1$ 的条件下,$\frac{K}{p}$ 不可能为整数,因此不存在等电位点。但是单波绕组只有一对支路,每一条支路所串联的元件是分布在电机所有的磁极底下,即使每极磁通有差异,也不会引起支路感

应电动势的不相等。所以单波绕组不可能联均压线，也不需要联均压线。

对于复波绕组，虽然每一条支路所串联的元件也是分布在电机所有的磁极底下，每极磁通的差异也不会引起各条支路感应电动势不相等，但是复波绕组的 a 对支路是通过换向器上的电刷并联起来的，由于电刷与换向片之间的接触电阻是变动的，这就会引起支路中的电流不相等和换向片上的电压分布不均匀。如果把各对支路间(相应于各个单波绕组间)的等电位点用导线联起来，就可以消除接触电阻不均匀的影响。这种均压线一般称为乙种均压线。乙种均压线的均压线节距是

$$y_{eqK}=\frac{K}{a} \tag{3-11}$$

可以联乙种均压线的条件应该是

$$y_{eqK}=\frac{K}{a}=\text{整数}$$

$$\frac{y_{eqK}}{u}=\frac{\frac{K}{a}}{u}=\frac{\frac{K}{u}}{a}=\frac{Z}{a}=\text{整数}$$

$$\frac{p}{a}=\text{整数}$$

上面三式显然就是式(3-7)、(3-8)和(3-9)。

对于复叠绕组，由于磁场的不对称，可以引起各支路间的电流分配不均匀；也由于电刷接触电阻的变化，经电刷并联起来的各支路间的电流也会分配不均匀。为了克服这些不良现象，应该采取的措施是：在构成复叠绕组的每个单叠绕组中把等电位点联接起来，在几个单叠绕组间也把等电位点联起来，以同时消除磁的不对称和接触电阻的不相等的影响。这也就是说，在复叠绕组中应兼用甲、乙两种均压线。均压线的均压

线节距（等电位点间的跨距）应等于$\frac{K}{p}$。但是，复叠绕组不一定都能够联甲、乙两种均压线。例如$K=16$, $u=1$, $2p=4$，绕成双叠绕组，$\frac{K}{a}=\frac{Z}{a}=\frac{Z}{m_L p}=\frac{16}{4}=4=$整数，$y_{eqK}=\frac{K}{p}=\frac{16}{2}=8$，这时在换向器端所联的均压线是属于甲种的，而无法联乙种均压线。又例如$K=18$, $u=1$, $2p=4$，绕成双叠绕组，$\frac{K}{a}=\frac{Z}{a}=\frac{18}{4}=4\frac{1}{2}\neq$整数，而$y_{eqK}=\frac{K}{p}=9$，这时可以在换向器端联乙种均压线，而无法联甲种均压线。再如$K=17$, $u=1$, $2p=4$，绕成双叠绕组，因$y_{eqK}=\frac{17}{2}\neq$整数，就找不到等电位点，也就不可能联均压线。可以联均压线的条件是$\frac{K}{p}=$整数，但这时不一定和前面所指的绕组的对称条件相吻合。

不符合绕组的对称条件，但有等电位点可联均压线，称为实际对称绕组，在每极槽数较大时，一般能良好运行。例如双叠绕组，$2p=6$, $K=387$, $m_L=2$，从而$a=m_L p=6$，$\frac{K}{a}=64\frac{1}{2}\neq$整数，不符合对称条件，但$\frac{K}{p}=129$是整数，有等电位点可联均压线，属于实际对称绕组。又如六波绕组，$2p=6$, $K=387$, $m_W=6$，从而$a=m_W=6$, $\frac{K}{a}=64\frac{1}{2}\neq$整数，且$\frac{p}{a}=\frac{3}{6}\neq$整数，不符合对称条件，但$\frac{K}{p}=129$是整数，有等电位点可联均压线，也属于实际对称绕组。用上面的双叠和六波绕组可以组成双蛙绕组，实践证明可以获得满意的运行。

对于蛙绕组，由于$y_{KL}+y_{KW}=\frac{K}{p}$，在等电位点之间就有一个叠绕组元件和一个波绕组元件联起来，再由于$y_{1L}+$

$y_{1w}=\frac{K}{p}$，在一个迭绕组元件和一个波绕组元件所串联的电路中，其合成电动势为零，所以这两个元件就可以起均压线作用，不必再用绕组外面的导线作均压线。

所以，对称条件的实用意义就在于可以保证在各对支路之间联接均压线。但是反过来说，不符合对称条件的绕组在某种情况下也可以联均压线而得到正常的运行。

在进行绕组设计时，一般要校核绕组的对称条件，如式(3-7)至(3-9)所示。不过，不符合对称条件的绕组，在有一定的实践经验可作依据时，也不是不可以应用的。

五、绕组型式的选择

绕组型式的选择主要是根据所设计电机的电枢电流 I_a 来决定的，根据制造工艺的要求，电枢导线的电流$\left(\text{即支路电流 } i_a=\frac{I_a}{2a}\right)$不能太大。因为如果支路电流太大，则导线的截面将太粗，使制造和嵌线困难。支路电流也不能太小，因为这样会使导线截面太细，使槽的利用率太差。根据制造经验，支路电流 i_a 不宜超过 300～350 安。对小容量电机而言，i_a 一般限制在 200 安以内；对低电压大电流的电机而言，支路电流需要选得大些，约可达 500～600 安。

因此，当电枢电流较大时，就要求并联支路数 $2a$ 增多，不同的绕组型式具有不同的 $2a$ 值，就可以与之相适应。具体来说：

单波绕组，$a=1$，支路数最少，每支路所串联的元件数较多，不需联均压线，制造方便，用于小功率及电压较高或转速较低的电机。

复波绕组，$a=m_w$，支路数比单波绕组多，可能比单叠绕

组少,可用于多极数的低速中、大型电机。

单叠绕组, $a=p$, 支路数比波绕组多,用于正常电压和转速的电机。

复叠绕组, $a=m_Lp$, 支路数比单叠绕组多,适用于大功率或低电压大电流的电机。

单蛙绕组, $a=2p$, 换向性能较稳定, 应用范围与单叠绕组相同,并可省去均压线。

复蛙绕组, $a=2m_Lp$, 支路数比单蛙绕组多,应用范围与复叠绕组相同,并可省去均压线。

一般中小型电机采用单波、单叠或单蛙绕组。对于某些负载变化剧烈的电机(如轧钢用电机),由于其换向条件较差,一般需采用蛙绕组。

3-2 电枢绕组的设计

一、电枢槽数的选择

电枢槽数 Z 的多少,对电机性能会有影响。根据生产实践经验,每极槽数按表 3-2 选择。

表 3-2 电枢外径与每极槽数的对应关系

电枢外径 D_a(cm)	≤24.5	29.4～42.3	49.3～65	74～99	≥120
每极槽数 $\frac{z}{2p}$	6～12	7～14	9～20	12～22	14～28

槽数的选择一般可从以下几方面考虑:

(1) 增加每极的电枢槽数 $\frac{Z}{2p}$, 当元件总数为一定时,可减少分配到每个槽的元件数, 从而降低槽中各换向元件间的互感影响,使电抗电动势减少,有利于换向;同时,每极的槽数增多后,绕组接触铁心的面积增加, 有利于散热。但是,每极

槽数增多后，槽绝缘也相应增多，使槽面积的利用率降低，而且电机的制造工时也会有所增加。

小型电机的电枢齿槽还常沿轴向扭斜一个角度，称为斜槽，以削弱电机的噪声和低速时的蠕动，槽在电枢两端斜过的距离约为 0.5～1.0 电枢齿距。

(2) 如果电机的槽数过多，则电枢齿距

$$t_a=\frac{\pi D_a}{Z}\quad (厘米) \tag{3-12}$$

过小，齿根容易损坏。齿距 t_a 常用的限值如下：

当 $D_a<30$ 厘米时，$t_a>1.5$ 厘米；

当 $D_a>30$ 厘米时，$t_a>2.0$ 厘米。

(3) 为了使槽内铜耗所产生的热量易于散出，还应核算每槽的电流总值 I_s，

$$I_s=\frac{N_a}{Z}\frac{I_a}{2a}=At_a\quad (安)$$

并应在下列的范围内：

当 $D_a<100$ 厘米时，$I_s<1500$ 安；

当 $D_a>100$ 厘米时，$I_s<2000$ 安。

(4) 电枢槽数应符合绕组的绕制规则和对称条件。对于 D_a 大于 99 厘米的扇形电枢冲片，槽数还应符合扇形分片的要求。

二、电枢绕组的基本数据

1. 每槽元件数及元件匝数

(1) 电枢导体总数 N_a

预计的电枢导体总数可用下式计算

$$N'_a=\frac{\pi D_a A}{I_a}2a \tag{3-13}$$

其中 A——从图 2-3 查得的数值。

每槽的导体数 N_s 为

$$N_s=\frac{N'_a}{Z} \tag{3-14}$$

应该取最接近的偶数。

于是，可得到电枢导体的总数

$$N_a=N_sZ \tag{3-15}$$

(2) 每槽元件数 u

$$u=1、2、3、4、5$$

u 必须是整数，一般不超过 5。u 的选择要注意满足绕组的绕制规则和对称条件；同时，也要注意与它有关的换向片数和换向片间的平均电压。如果选择不当，要作适当调整。

有时，为了冲片的通用性，使 $S=K=uZ$ 的数值不能满足绕组的绕制规则，在这种情况下不得不作适当处理。例如，对于单波绕组，$y_K=\frac{K\mp1}{p}=$整数，$K=S=uZ$ 的数值就要受到极对数 p 的限制。当 K 不能满足绕制单波绕组的条件时，常将槽中某一元件不联在绕组内，成为假元件（也称死线圈）。为了使电枢保持运转时机械上的平衡，该元件仍嵌在槽中。这样，换向片数 K 将比元件数 S 少一个，以保证 K 可以满足 y_K 成为整数的条件。例如 ZZY-12-H 船用起重电机，3 千瓦，220 伏，1200 转/分，4 极，$Z=25$，$u=4$，$S=uZ=4\times25=100$，选用单波绕组，换向片数 $K=99$，S 中有一个是假元件。在换向片数较少的情况下，由于采用假元件后绕组不对称所引起的支路电动势不平衡比较显著，这时应避免采用假元件。

(3) 元件匝数 W_a

$$W_a=\frac{N_a}{2uZ}=\frac{N_s}{2u} \tag{3-16}$$

或

$$W_a = \frac{N_a}{2K} \tag{3-17}$$

对于 $D_a<20$ 厘米的电机，常用梨形槽和散嵌的圆导线线圈，为了使同一机座号中各种规格的电机的电磁负荷基本保持不变，每个元件的匝数有时需要做成分数匝，但分数匝的分母应为 u。例如有一台他励直流发电机，9 千瓦，230 伏，39.1 安，2850 转/分，$2p=4$，设计时取 $u=3$，$N_a=496$，$N_s=16$，可以算得每元件匝数 $W_a=\frac{N_s}{2u}=\frac{16}{2\times3}=2\frac{2}{3}$。这是指每个槽中三个元件的平均匝数。实际的情况是：每槽的二个元件各有 3 匝，而一个元件有 2 匝，平均匝数是

$$W_a=\frac{2\times3+1\times2}{3}=2\frac{2}{3}$$

对于 $D_a>20$ 厘米的电机，常采用矩形槽和成型的硬线圈，每个槽中各元件的匝数都是一样的，因此 W_a 必须是整数。为此，如果得不到 W_a 为整数时，须重新选取 N_s 或 u，再校核 N_a 或 Z 值。为了使换向元件中的电抗电动势 e_r 较小，以利于换向，W_a 应当越小越好，最好 $W_a=1$，尽量不超过 2。这种限制条件对小功率电机不易办到，但小电机的 e_r 数值较小，换向问题不十分严重，选用较大的 W_a 是可以允许的。

2．绕组的绕制规则

当绕组型式（包括复倍系数）和 Z、u、S、K 确定后，根据式(3-4)确定槽节距 y_s，根据表 3-1 中各种绕组类型的节距公式确定第一节距 y_1，换向节距 y_K 和第二节距 y_2。有了这些数据之后，就确定了各线圈端头和换向片之间和各个元件之间的联接规则，从而可以绘制绕组展开图或在制造时直接进行联线。

3. 电枢导线截面的选择

电枢导线截面的选取决定于导线的电流密度 J_a。如果选取的 J_a 较大，则导体截面较小，从而缩小槽形，还可以相应地减小铁心尺寸，因此能节省材料，减轻重量和降低成本；但是 J_a 大时，铜耗增大，效率下降，运行费用提高，电机温升上升。为了节省电机的有效材料，电机设计中总是希望选用较大的 J_a 值，这时需加强电机的冷却或者使绝缘等级提高。因此，电枢绕组电流密度 J_a 的大小，与电机的绝缘等级、结构型式、冷却条件和转速等因素有关。

电机的温升决定于总的损耗、损耗在电机各部分的分布以及通风散热等各种因素，但是工厂中常用 A 和 J_a 的乘积的数值来控制电机温升中的关键部分——电枢温升。因为可以证明（见第二章）AJ_a 正比于电枢圆周单位表面积的槽内铜耗，对于同一电枢，AJ_a 增大，槽内铜耗相应增大，所以电枢温升就升高。AJ_a 通常称为热负荷。因此，从温升的角度出发，可以找到允许的 AJ_a 值，从这个 AJ_a 值算出允许的 J_a 值。

对于B级绝缘的电机在不同电枢直径时的热负荷范围如图 3-5 所示。在自通风的中小型电机中，转速高的电机散热较好，可取较大的 AJ_a 值。但在强迫风冷的大、中型电机中，转速高的电机铁耗也较大，而通风散热条件改善不多，应取较小的 AJ_a 值。封闭式电机的热负荷应选得低些；F 级、H 级绝缘的热负荷可取得高些。

由于电负荷为

$$A=\frac{N_a I_a}{2a\pi D_a} \quad (\text{安/厘米}) \tag{3-18}$$

从图 3-5 查得 (AJ_a) 值后就可以算出预计的电枢导线电流密度

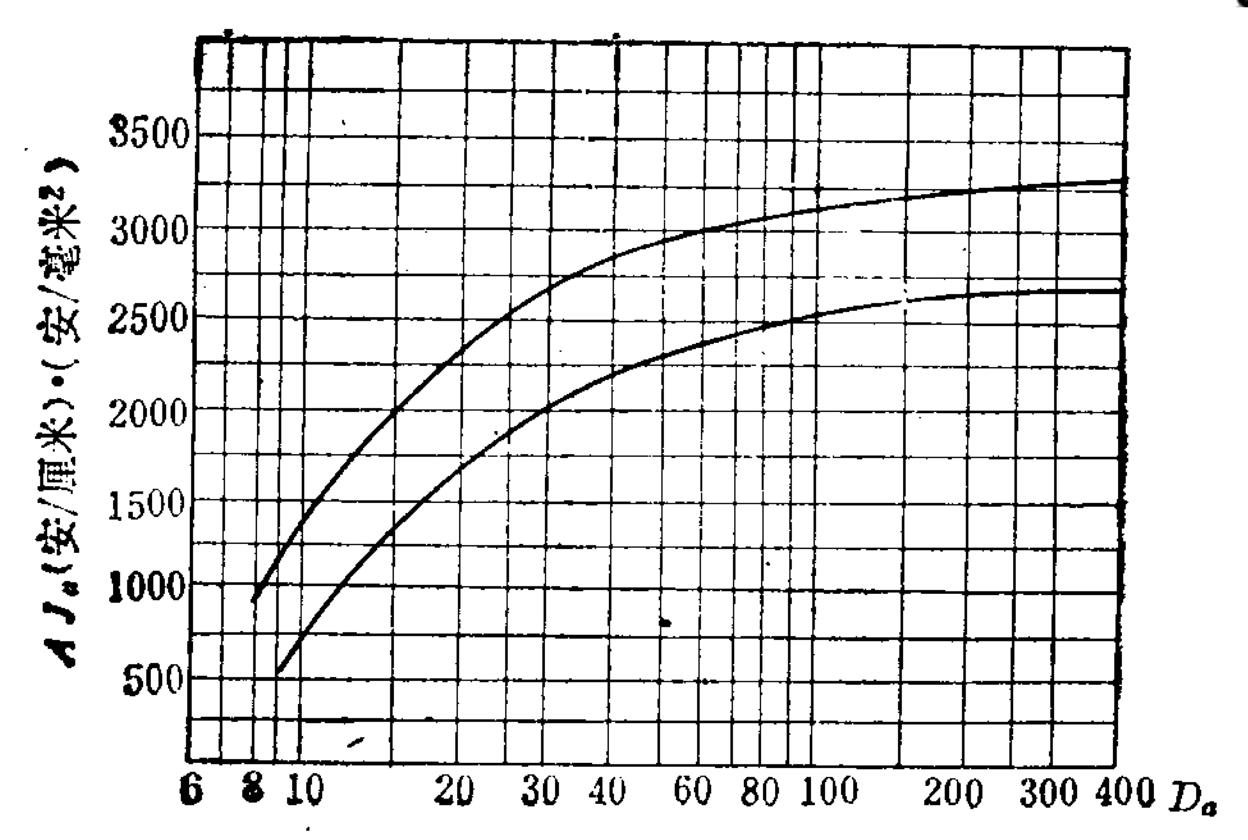


图 3-5 热负荷 AJ_a 与电枢外径 D_a 的关系

$$J'_a = \frac{(AJ_a)}{A} \quad (\text{安/毫米}^2) \tag{3-19}$$

而每支路的电流值为

$$i_a = \frac{I_a}{2a} \tag{3-20}$$

于是预计的导线截面积 $A'_{\mathrm{Cu}\,a}$ 为

$$A'_{\mathrm{Cu}\,a} = \frac{i_a}{J'_a} \quad (\text{毫米}^2) \tag{3-21}$$

再调整到相邻近的标准导线线规，得到 $A_{\mathrm{Cu}\,a}$。

用于梨形槽的圆导线直径不宜超过 1.68 毫米，导线截面不够时可用两根或最多不超过三根并绕。导线截面较大时宜用扁线，这时应选用矩形槽，导线的高度与宽度应结合矩形槽的形状和槽绝缘确定。

4．电枢绕组导线的总长、重量和电阻

(1) 绕组元件的平均半匝长度 l_{aav}

$$\left.\begin{aligned} l_{aav} &= 0.88\tau + l_a \ (\text{厘米}) \ (\text{对于梨形槽}\ 2p=2) \\ l_{aav} &= 1.1\tau + l_a \ (\text{厘米}) \ (\text{对于梨形槽}\ 2p=4) \\ l_{aav} &= 1.4\tau + l_a \ (\text{厘米}) \ (\text{对于矩形槽}\ 2p=4) \end{aligned}\right\} \tag{3-22}$$

对于大、中型电机的元件平均半匝长度可以根据成型后的具体形状用几何关系算出，或者用下式估算

$$l_{aav}=l_a+2\frac{\left(\frac{D_a}{2}-h_s\right)\pi}{2p\sqrt{1-\left(\frac{b_s}{t_{a\min}}\right)^2}}+2.5h_s \quad (厘米) \qquad (3\text{-}23)$$

式中　h_s——槽高(厘米)；

b_s——槽宽(厘米)；

$t_{a\min}$——最小齿距，即在齿根处的齿距(厘米)。

(2) 电枢绕组导线总长 $L_{Cu\,a}$

$$L_{Cu\,a}=N_a l_{aav} \quad (厘米) \qquad (3\text{-}24)$$

(3) 电枢绕组铜重 $G_{Cu\,a}$

$$G_{Cu\,a}=8.9L_{Cu\,a}A_{Cu\,a}\times10^{-5} \quad (公斤) \qquad (3\text{-}25)$$

(4) 电枢绕组电阻 R_a

电枢电路由 $2a$ 条支路并联，每条支路的长度为 $\frac{L_{Cua}}{2a}$，截面为 $A_{Cu\,a}$，因此电阻为

$$\left.\begin{aligned}R_{a75°C}&=\frac{L_{Cua}}{A_{Cu\,a}(2a)^2}\times2.17\times10^{-4} \quad (欧)\\R_{a115°C}&=\frac{L_{Cu\,a}}{A_{Cu\,a}(2a)^2}\times2.45\times10^{-4} \quad (欧)\end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}26)$$

上式中 2.17×10^{-4}、2.45×10^{-4} 分别为 75°C、115°C 时铜的电阻率(欧·毫米²/厘米)。GB755-65 规定：A、E、B 级绝缘导线用 75°C 时的电阻率计算其导线损耗和电机效率；而 F、H 级绝缘导线则用 115°C 时的电阻率计算。

三、均压线的选用

1. 均压线根数

电枢绕组，除了单波绕组和蛙绕组以外，必须采用均压

线。叠绕组的均压线节距 $y_{eqK}=\frac{K}{p}$，全额均压线的根数 $N_{eqm}=\frac{K}{p}$，其中每根均压线联接所有的某一个等电位点。波绕组的均压线节距 $y_{eqK}=\frac{K}{a}$，全额均压线的根数 $N_{eqm}=\frac{K}{a}$，其中每根均压线联接所有的某一个等电位点。这些都是指均压线接在绕组一端的情况而言的。全额均压联接仅用于某些大型或换向困难的电机,而对于一般中小型电机通常只联接 $N_{eq}=\frac{N_{eqm}}{u}$ 根，即每槽联一根均压线。N_{eq} 与 N_{eqm} 之比称为均压线的分额数。均压线的分额数愈大,所起的均衡作用越好。

2．均压线的截面

均压线的截面通常为电枢绕组导线截面的20～50%，均压线的分额数高时,其截面可取得小些。均压线截面过小,将降低均压线所起的均衡效果；均压线截面过大，用铜量增加，同时导致均压线布置困难。

3．均压线的结构

均压线的结构有三种型式，见图3-6。其中人字式均压线广泛使用于大、中、小型电机的叠绕组中；环形均压线一般用于复波绕组中；渐开线式均压线直接将换向片和电枢绕组的等电位点联接起来,它兼起升高片的作用,有时用于大型电机的叠绕组中。

接在绕组一端的均压线可安装在换向器端，直接与换向器的升高片联接；均压线也可安装在非换向器端,借并头套与线圈鼻端相联，如图3-7所示。均压线安装在换向器端较为方便,且效果较好,但应注意由于电刷磨损所引起的碳粉累积可能会造成短路故障；均压线接在非换向器端时,安装结构较为复杂,但便于修理。

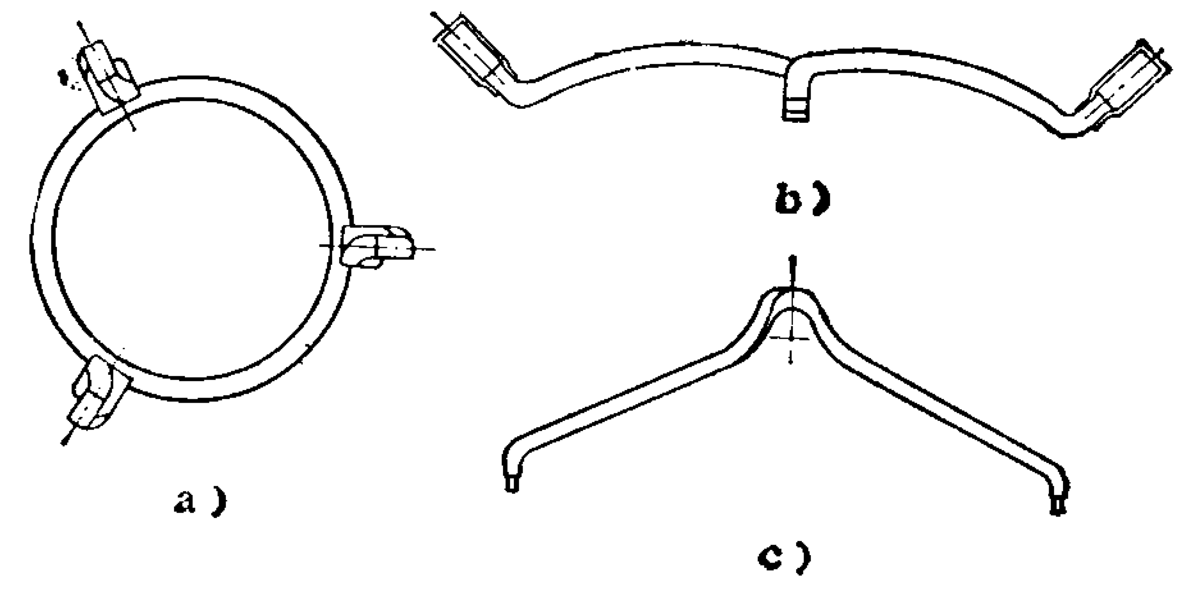


图 3-6　均压线的结构形式

a) 环式　b) 渐开线式　c) 人字式

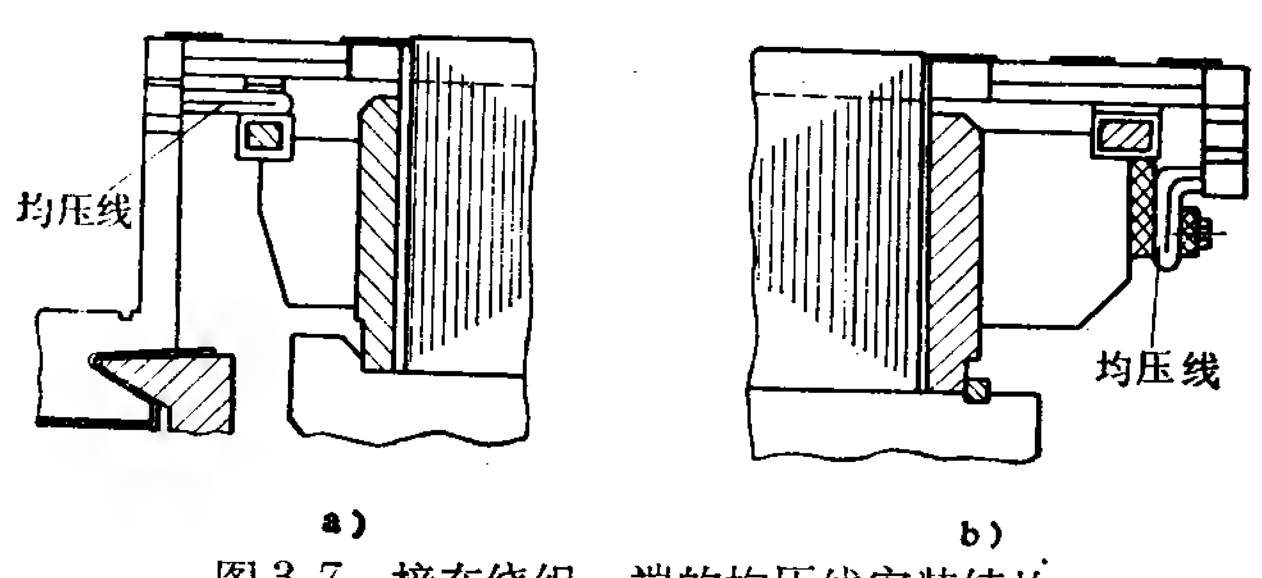


图 3-7　接在绕组一端的均压线安装结构

a) 均压线在换向器端　b) 均压线在非换向器端

3-3　电枢绕组的绝缘

一、绝缘材料等级与直流电机的绝缘材料

电机的绝缘与电机的技术经济指标、电气性能、运行可靠性、使用寿命等有密切的关系。电机的绝缘结构应在机械强度、耐热性能、绝缘强度和热态绝缘电阻等方面都能保证电机可靠地运行。

电机所用的绝缘材料在 JB794-66《电机、电器和变压器用绝缘材料耐热分级》标准中按耐热性能分成七级，见表 3-3。

表 3-3　绝缘材料的耐热分级表

级　　别	Y	A	E	B	F	H	C
长期使用的限制温度(°C)	90	105	120	130	155	180	>180

直流电机的绝缘等级通常为 B、F、H 级，一般应按规定的绝缘等级选用相应的绝缘材料。但有时为了使绝缘材料有更大的可靠性，或为了延长使用寿命，有时也选用比规定的绝缘等级高一级的绝缘材料，如 F 级绝缘的电机采用 H 级材料。同时，也由于直流电机中各部分的实际工作最高温度与规定的最高允许工作温度不完全相同，所以也可根据电机各部位的实际工作最高温度选用相应等级的绝缘材料。

直流电机绝缘材料的选用，如导线绝缘、线圈对地绝缘、层间绝缘、槽绝缘、浸渍漆等，应从电气、机械、物理和化学性能及其工艺性、经济性等各方面综合考虑。随着技术的发展，绝缘材料和电磁线的品种不断增多和更替，下面仅将目前常用的列于表 3-4，以作参考。

二、电枢绕组的绝缘结构

电枢绕组的绝缘按结构可分为电枢线圈及槽部绝缘、端接部分绝缘和绕组支撑绝缘等。

1. 电枢线圈及槽部绝缘

电枢线圈及槽部绝缘包括下列几种绝缘：

导线绝缘　它是导线外表面所包的绝缘，用高强度绝缘漆或玻璃丝。

匝间绝缘　它是电枢线圈 W_a 匝间和槽内同一层的 u 个元件边间的绝缘。在正常情况下，导线的绝缘已足够能承受绕组元件的匝间电压，故线圈在槽内的直线部分往往不采用另外的匝间绝缘。

表 3-4 直流电机常用的绝缘材料和电磁线

名称	B 级	F 级	H 级
电磁线	聚酯漆包圆铜线 QZ-1，QZ-2 聚酯漆包圆铝线 QZL-1，QZL-2 聚酯漆包扁铜线 QZB 聚酯漆包扁铝线 双玻璃丝包扁铜线 SBECB 双玻璃丝包扁铝线 SBELCB 单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线 QZSBCB	聚酯亚胺漆包圆铜线 QZY-1，QZY-2 聚酯亚胺漆包扁铜线 QZYB	聚酰亚胺漆包圆铜线 QY-1，QY-2 聚酰胺酰亚胺漆包圆铜线 QXY-1，QXY-2 聚酰亚胺漆包扁铜线 QYB 聚酰胺酰亚胺漆包扁铜线 QXYB 硅有机浸渍双玻璃丝包圆铜线 SBEG 硅有机浸渍双玻璃丝包扁铜线 SBEGB
对地绝缘 槽绝缘	环氧玻璃粉云母带 5438-1 聚酯薄膜聚酯纤维纸复合箔(DMD) 醇酸玻璃柔软云母板 5131 醇酸玻璃漆布 2432 聚酯薄膜玻璃漆布复合箔 6530 聚酯薄膜、环氧酚醛上胶玻璃漆布	聚酯薄膜耐高温合成纤维纸复合箔(简称 NMN) 耐高温合成纤维纸 环氧酚醛上胶玻璃漆布	聚酰亚胺薄膜耐高温合成纤维纸复合箔(简称 NHN) 有机硅玻璃云母带 5450 有机硅玻璃粉云母带 5450-1 有机硅玻璃柔软云母带 5151-1 耐高温合成纤维纸 聚酰亚胺薄膜

（续）

名　称	B　级	F　级	H　级
层间绝缘	DMD 醇酸玻璃柔软云母板 5131 聚酯薄膜玻璃漆布复合箔 6530	NMN 耐高温合成纤维纸	NHN 耐高温合成纤维纸 有机硅玻璃柔软云母板 5151-1
槽楔 垫条 出线板	环氧酚醛层压玻璃布板 3240	环氧酚醛层压玻璃布板 3240	有机硅层压玻璃布板 3251 聚二苯醚层压玻璃布板 聚胺酰亚胺层压玻璃布板
浸渍漆	环氧聚酯酚醛无溶剂漆 5152-2 环氧酯漆 1033 三聚氰胺醇酸漆 1032	不饱和聚酯无溶剂漆 319-2 聚酯浸渍漆 155	有机硅浸渍漆 1053 低温干燥有机硅漆 931
引接线	橡皮绝缘丁腈护套引接线 JBQ	硅橡皮绝缘引接线 JHXG	硅橡皮绝缘引接线 JHXG
电工用塑料	酚醛定长玻璃纤维塑料 玻璃纤维增强聚碳酸酯塑料 玻璃纤维增强尼龙塑料	聚胺酰亚胺定长玻璃纤维压塑料	聚胺酰亚胺定长玻璃纤维压塑料

层间绝缘　它是同一槽内上层与下层线圈边间的绝缘。散嵌线圈的层间绝缘每边要伸出铁心20毫米,其宽度应较槽的最大宽度大8毫米。成型线圈一般可不需另加层间绝缘,而由对地绝缘兼顾。

对地绝缘　它是电枢线圈与铁心间的绝缘。散嵌线圈的对地绝缘就是铁芯槽内的槽绝缘,而成型线圈的对地绝缘是包在线圈上的。

槽绝缘和槽底垫条　它是在嵌线前预先放在槽内的绝缘,对于散嵌线圈主要作为对地绝缘,兼起衬垫作用;对于成型线圈主要使槽面平滑,起机械衬垫作用。为了保护线圈伸出铁心的部分,槽绝缘和槽底垫条应在铁心轴向每边伸出6～25毫米;同时为了便于嵌线和保护线圈绝缘免受嵌线时的机械损伤,槽绝缘应高出槽口10～15毫米,在嵌线后剪去一部分,余下的压在槽楔或绑带下。

槽楔或绑带　它是线圈嵌好后打入或绑扎的。当电枢旋转时,电枢绕组借槽楔或绑带固定在槽内。

2．端接部分绝缘

电枢绕组的端接部分因不与电枢铁心直接接触,因此这部分的绝缘可以比槽内部分薄一些,以节约绝缘材料和改善冷却条件。在线圈的鼻端因易受到制造时弯曲的机械损伤,要加强层间绝缘。对梨形槽绕组端接部分的层间绝缘,用一层0.25毫米厚的DMD复合箔;对小型电机矩形槽绕组端接部分的层间绝缘,用两层0.25毫米厚的DMD复合箔。

3．绕组支撑绝缘

以小型电机矩形槽的电枢绕组为例,绕组端部用环氧或聚酯无纬玻璃丝带固定,在绕组端部与绕组支架之间用环氧酚醛玻璃布板绝缘。

电枢绕组所使用的绝缘材料及其尺寸，即绝缘规范，因不同条件而有多种多样，例如：因电压等级而有差别；因槽形而异；因绝缘材料的耐热等级而不同；随绝缘材料的品种和性能的不断更新而变动以及随各个工厂的生产条件而有所出入。总之，绝缘规范不但随产品的规格而变化，并且也和制造产品的时间和地点有关。所以，这里不准备罗列各种绝缘规范，仅就目前某些常用的B级绝缘规范分述于下，如果认为这些绝缘规范在设计时不适用，可以从工厂中获得有关资料。

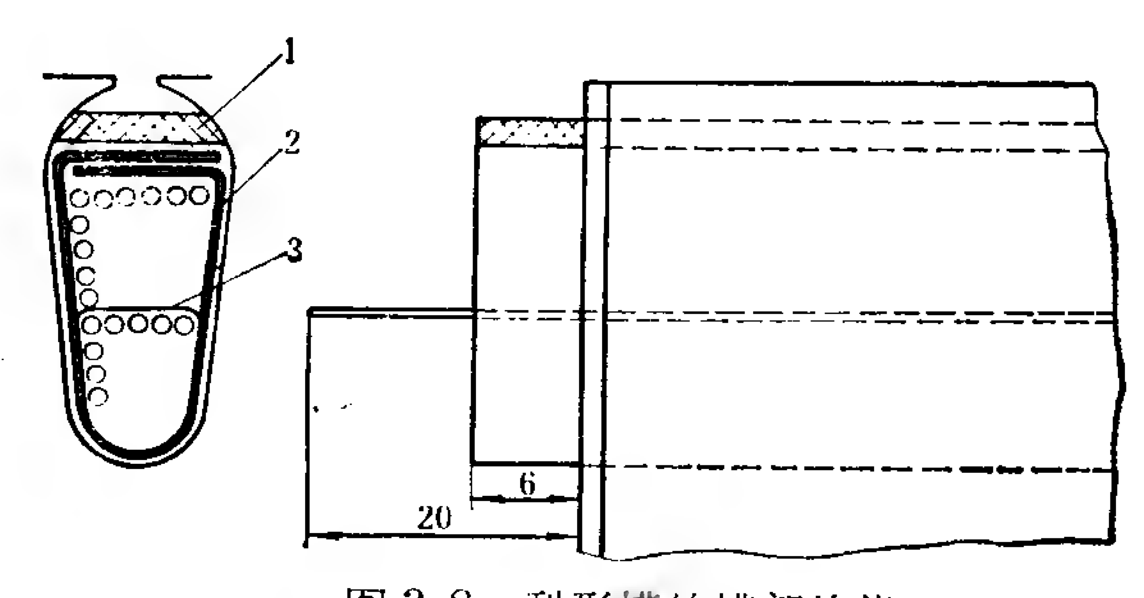


图 3-8　梨形槽的槽部绝缘

1—槽楔　2—槽绝缘　3—层间衬垫绝缘

表 3-5　梨形槽的槽部绝缘(尺寸单位：毫米)

序号	绝缘或零件名称	材料			一侧层数	一侧绝缘厚度
		名　称	牌　号	厚　度		
1	槽　楔	环氧酚醛玻璃布板	3240	1.5	1	1.5
2	槽绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.35	1	0.35
3	层间衬垫绝缘	同上①	DMD	0.35	1	0.35

① 槽形小的，如Z3系列电机中的1～2号机座，改用0.25的聚酯薄膜复合箔。

(1) 梨形槽的槽部绝缘材料及其尺寸 见图3-8和表3-5。

(2) 小型电机矩形槽的槽部绝缘材料及其尺寸 见图3-9和表3-6、表3-7。

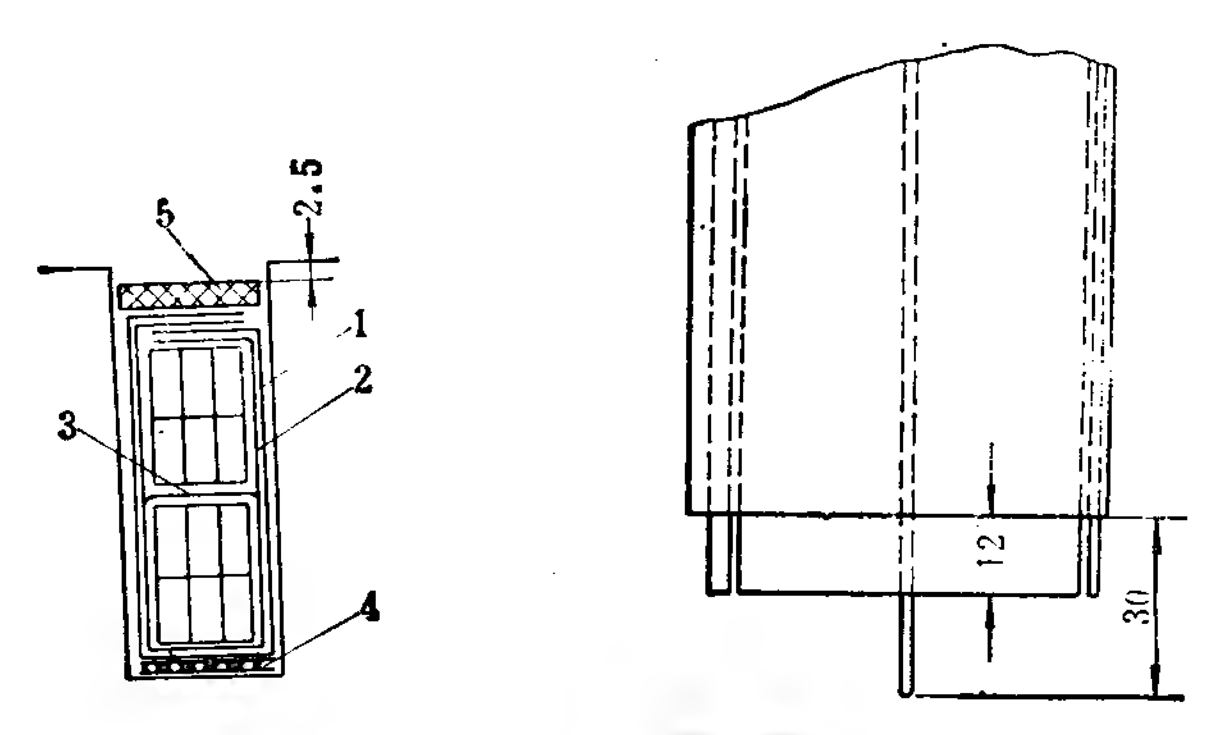


图3-9 小型电机矩形槽的槽部绝缘

1—槽绝缘 2—槽绝缘 3—层间衬垫绝缘 4—槽底衬垫绝缘 5—槽盖板

表3-6 小型电机矩形槽的槽部绝缘(单位尺寸: 毫米)

序号	绝缘或零件名称	材料			层数	两侧绝缘厚度	
		名称	牌号	厚度		高	宽
1	槽绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜复合箔	DM	0.12	1	0.24	0.36
2	槽绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.25	1	0.50	0.75
3	层间衬垫绝缘	同上	DMD	0.25	1		0.25
4	槽底衬垫绝缘	环氧酚醛玻璃布板	3240	0.5	1		0.5
5	槽盖板	环氧酚醛玻璃布板	3240	1.0	1		1.0

表 3-7 小型电机矩形槽的槽形尺寸计算表

	宽 度 (毫米)	高 度 (毫米)
槽两侧绝缘厚度	0.74	2.86
绝缘膨胀及铜线弯曲	$0.05u$	0.2
绕组尺寸	uB	$2W_aH$
下线余隙	0.2	0.2
扎线槽沟深度		2.5
槽公差	0.3	0.3
槽尺寸	$1.24+u(B+0.05)$	$6.06+2W_aH$

说明：W_a 是线圈的匝数，u 是每槽的虚槽数，B 和 H 分别是绝缘导线宽度和高度方向的最大尺寸。如果导线是由两根小截面的导线合并而成，则 H 为两个小截面导线的高度之和。

(3) 中型电机矩形槽的槽部绝缘材料及其尺寸 见图 3-10 和表 3-8。

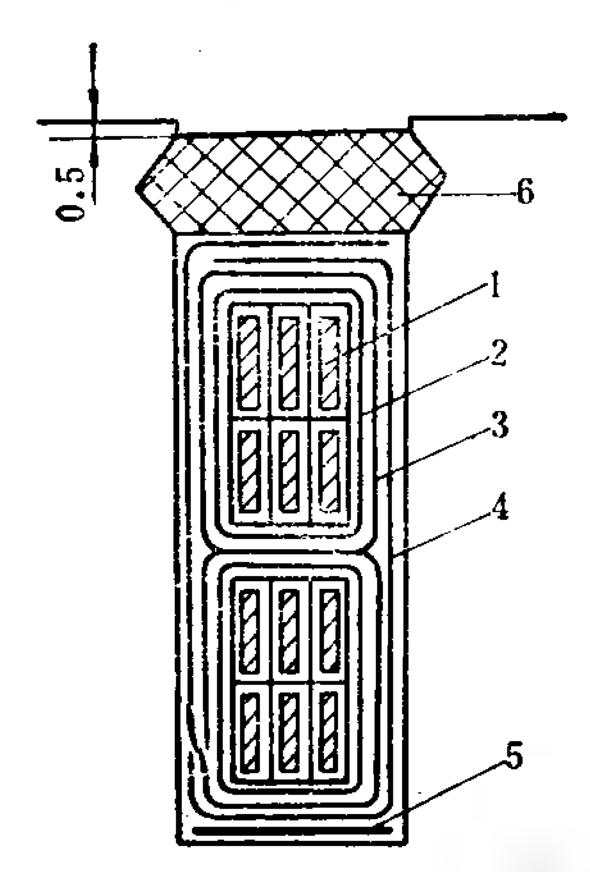


图 3-10 中型电机矩形槽的槽部绝缘

1—导线 2—对地绝缘 3—保护带 4—槽绝缘 5—槽底垫条 6—槽楔

表 3-8 中型电机矩形槽的槽部绝缘与槽形尺寸计算表

序号	材料名称	绕制方法	宽度(毫米)	高度(毫米)
1	双玻璃丝包铜线		uB	$2W_aH$
2	对地绝缘，桐油酸酐环氧粉云母带 0.14×25	半迭绕 2 层	1.12	2.24
3	保护带，玻璃丝带 0.1×25	平绕 1 层	0.2	0.4
	线圈公差		0.25	0.5
4	槽绝缘，0.2 聚酯薄膜玻璃漆布 2252		0.4	0.6
5	槽底垫条，0.2 环氧玻璃布板	1 层		0.2
	槽公差		0.3	0.3
6	槽楔			4
	槽口高			0.5
	槽形尺寸		$uB+2.27$	$2W_aH+8.74$

说明：W_a、u、B、H 的含义和表 3-7 相同。

(4) 小型电机绕组支撑绝缘 见图 3-11 和表 3-9。

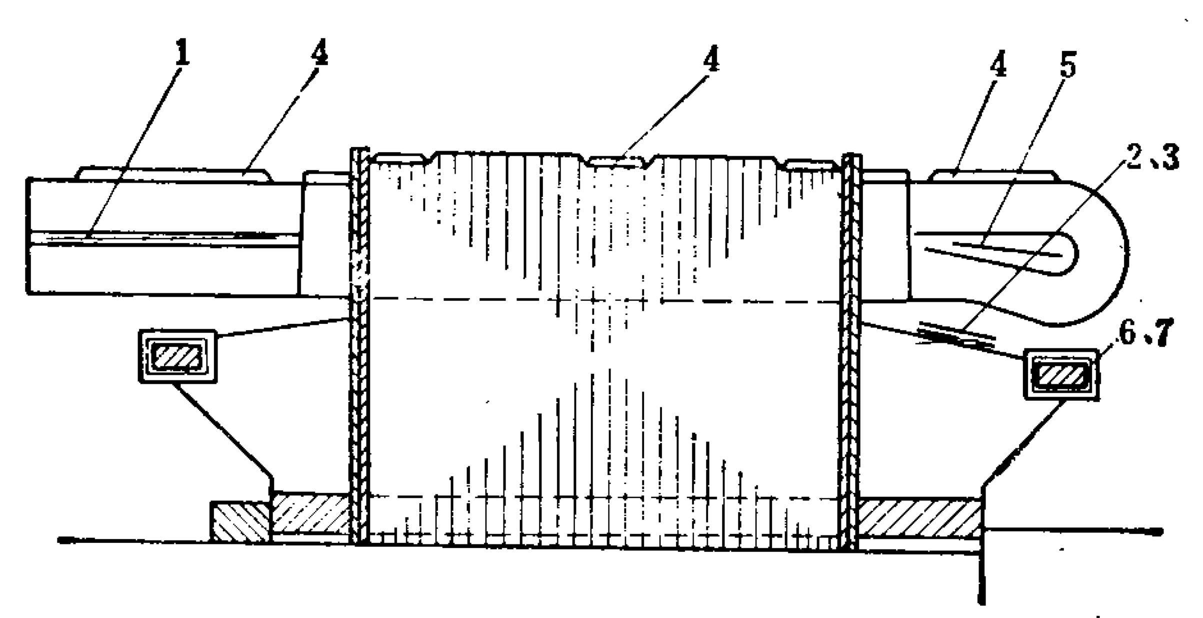


图 3-11 小型电机矩形槽绕组的支撑绝缘

1—引线层间绝缘 2、3—绕组支架绝缘 4—绑带
5—端部层间绝缘 6、7—绕组支架圈绝缘

表 3-9 小型电机矩形槽绕组的支撑绝缘

序号	绝缘或零件名称	材料			层数
		名称	牌号	厚度（毫米）	
1	引线层间绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.25	2
2	绕组支架绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.25	2
3	绕组支架绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合带	DMD	0.25	足量
4	绑带	环氧或聚酯无纬玻璃丝带		0.17	足量
5	端部层间绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.25	2
6	绕组支架圈绝缘	环氧酚醛玻璃布板	3240	1.0	3
7	绕组支架圈绝缘	聚酯纤维纸-聚酯薄膜-聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.25	足量

3-4 电枢冲片尺寸

在选定了电枢绕组的型式、槽数、导体尺寸和绕组的绝缘结构后，就可以进一步确定电枢的槽形尺寸。

一、电枢槽形的选择

电枢的槽形有梨形槽和矩形槽两种。梨形槽的槽口为半闭口式，这样可减小磁极的表面损耗，适用于散嵌的圆导线绕组。这种槽形的齿宽在齿身各部分基本相等。梨形槽常用于电枢直径 D_a 小于 20 厘米的小电机。矩形槽的槽口为开口式，适用于矩形导线绕制的成型线圈，线圈在槽内排列整齐，不易松动，槽有效面积的利用率较高。这种槽形的漏磁导系

数较小，从而电抗电动势较小，有利于换向。矩形槽常用于电枢直径 D_a 大于 20 厘米的直流电机。

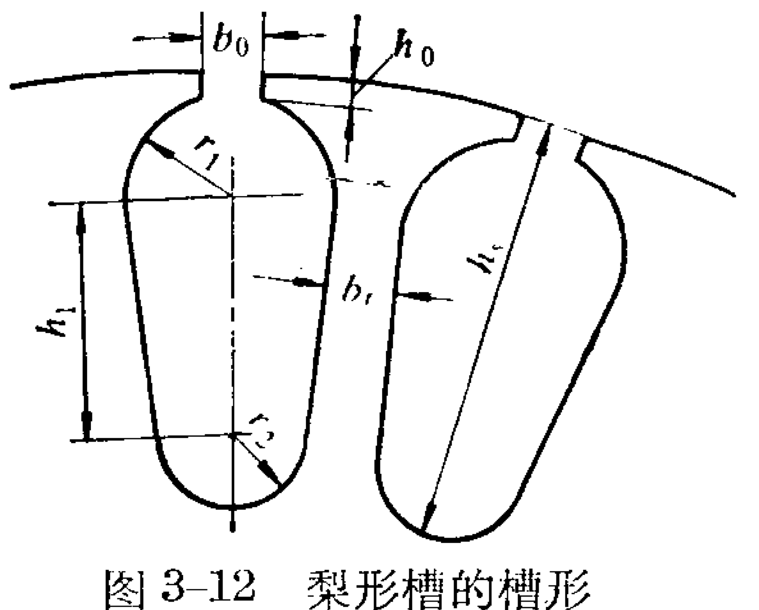


图 3-12 梨形槽的槽形

二、槽形尺寸

1. 梨形槽

如图 3-12 所示，可按下列次序确定其尺寸。

(1) 预计齿部磁通密度 B_t'

确定槽形尺寸时应使齿部磁通密度不致太高，以免齿部过分饱和而使它所需的磁动势过大。同时，齿部磁通密度过高亦会导致齿中铁耗太大。根据生产经验，B_t.一般在 17000～19500 高斯的范围内。

(2) 预计齿宽 b_t'

在一个齿距 t_a 范围内，进入电枢齿的磁通是

$$\phi_t = k_{Fe\,a} l_{Fe} b_t B_t \quad (\text{麦}) \tag{3-27}$$

式中 $k_{Fe\,a}$——电枢铁心的迭压系数，对 0.5 毫米厚的涂漆硅钢片，一般取 $k_{Fe\,a}=0.93$；

b_t——齿宽(厘米)；

l_{Fe}——电枢铁心净长(厘米)，由于采用梨形槽的电枢铁心一般无径向通风沟，所以 $l_{Fe}=l_a=l_\delta$。

这个磁通应与在同一齿距范围内经过气隙的磁通 $l_a t_a B_\delta$ 相等，由此得

$$0.93 l_{Fe} b_t B_t = l_a t_a B_\delta$$

即

$$b_t = \frac{l_a t_a B_\delta}{0.93 l_{Fe} B_t} = \frac{t_a B_\delta}{0.93 B_t} \quad (\text{厘米}) \tag{3-28}$$

当确定了 t_a、B_δ 和选定的 B'_t 代入上式后，可解得齿宽的初步值 b'_t。

(3) 槽口高度 h_0

为使齿顶有足够的机械强度，h_0 通常取为 0.05～0.08 厘米。

(4) 槽口宽度 b_0

通常取 $b_0=0.3\sim0.35$ 厘米，槽内圆导线的直径较粗时，b_0 宜取较大的值。

(5) 槽口半圆的半径 r_1

从图 3-12 可以看出

$$2r_1=\frac{\pi(D_a-2h_0-2r_1)}{Z}-b'_t$$

解得

$$r_1=\frac{\frac{\pi}{2}(D_a-2h_0)-b'_t}{2\left(1+\frac{\pi}{2}\right)} \quad (\text{厘米}) \qquad (3\text{-}29)$$

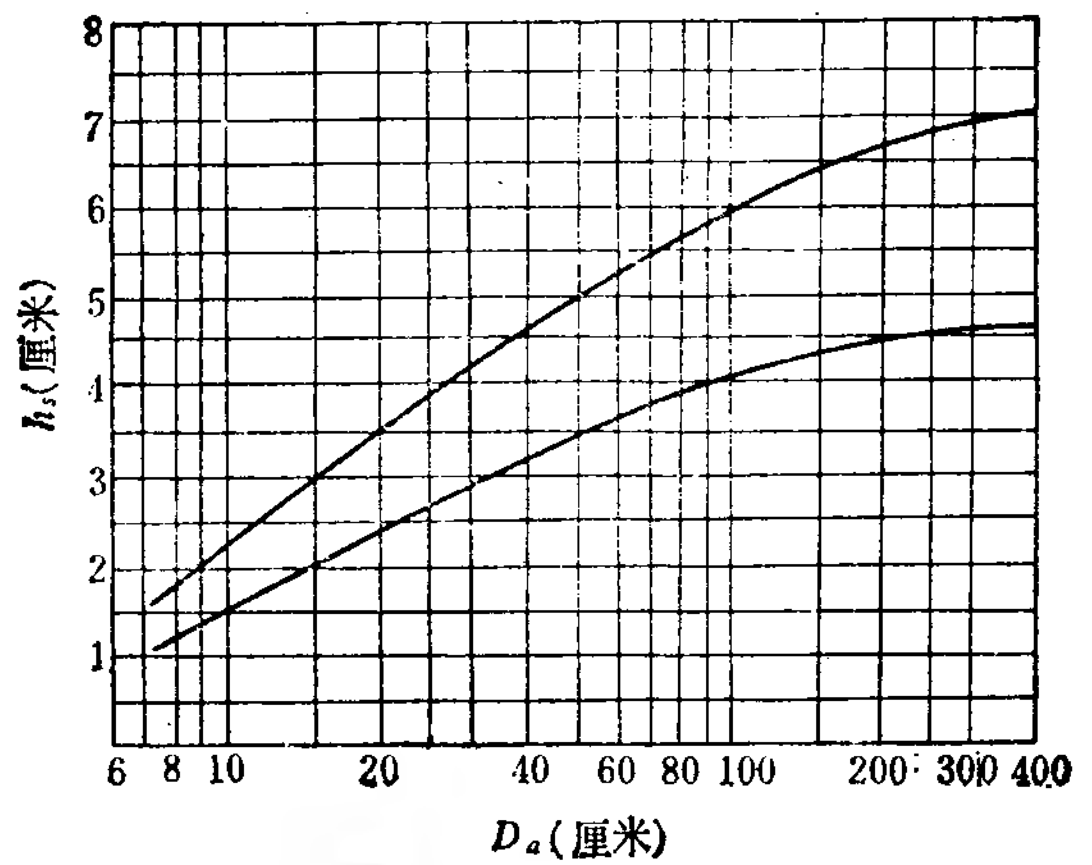


图 3-13 槽高 h_s 与电枢外径 D_a 的关系

(6) 槽高 h_s

槽高与电枢的外径有关,根据工厂的实际经验,其关系如图 3-13 所示。因此,槽高 h_s 的初步值可从图 3-13 选取。槽高选择的原则是:既要使槽内能够安放电枢导体,又要使齿部和轭部的磁通密度分配比较合理。因此,要在经过计算槽满率和电枢轭的磁通密度后,结合以前假定的齿部磁通密度,如果认为各方面都比较合适,才能最后确定 h_s。

(7) 槽底半圆的半径 r_2

从图 3-12 可以看出

$$2r_2=\frac{\pi(D_a-2h_s+2r_2)}{Z}-b'_t$$

解得

$$r_2=\frac{\frac{\pi}{Z}(D_a-2h_s)-b'_t}{2\left(1-\frac{\pi}{Z}\right)} \quad (\text{厘米}) \qquad (3\text{-}30)$$

(8) 齿平行部分高度 h_1

$$h_1=h_s-(h_0+r_1+r_2) \quad (\text{厘米}) \qquad (3\text{-}31)$$

(9) 齿宽

如果经过圆整后所取的 r_1、r_2 数值与前面的计算值有所差别,则齿宽应重算如下:

$$b_t=\frac{\pi[D_a-2(h_0+r_1)-h_1]}{Z}-(r_1+r_2) \quad (\text{厘米}) \quad (3\text{-}32)$$

(10) 槽的有效面积(净面积) A_s

所谓槽的有效面积 A_s 是指扣除槽楔和槽绝缘所占面积以后所剩下的槽面积,它近似为

$$A_s\approx(h_1+r_1-h_K-2\delta_i)(r_1+r_2-2\delta_i)$$

$$+\frac{\pi}{2}(r_2-\delta_i)^2-2(r_1+r_2)\delta_i \quad (\text{厘米}^2) \quad (3\text{-}33)$$

式中　δ_i——槽绝缘一侧的厚度，按表 3-5 取 0.025～0.035 厘米；

h_K——槽楔高度，按表 3-5 取 0.15 厘米。

槽中的绝缘规范见图 3-8 和表 3-5。

(11) 每槽绝缘导体所占的面积 A_ϕ

$$A_\phi = CN_s d^2 \times 10^{-2} \quad (\text{厘米}^2) \tag{3-34}$$

式中　C——线圈的并绕导线根数；

d——绝缘导线直径(毫米)。

(12) 槽满率 k_{sf}

$$k_{sf} = \frac{A_\phi}{A_s} = 0.75 \sim 0.80 \tag{3-35}$$

槽满率不适当时应调整槽高重算。

2．矩形槽

如图 3-14 所示，可按下列次序确定其尺寸。

(1) 预计槽高 h'_s

槽高的初步值可以从图 3-13 选取。

(2) 预计导体高度 H'

$$E' = \frac{h'_s - \delta_{ih}}{2W_a} \quad (\text{厘米}) \tag{3-36}$$

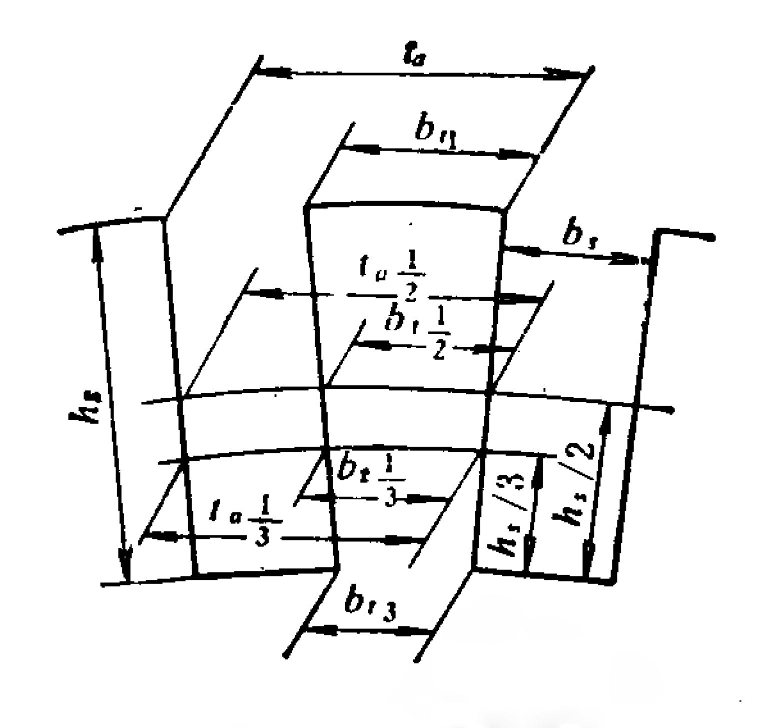


图 3-14　矩形槽的槽形

式中　δ_{ih}——包括槽高度方向的绝缘总厚、槽楔、铜线弯曲及嵌线余隙、槽形公差、槽口高等，以厘米为单位，可按表 3-7 或表 3-8 选取(注意表中单位为毫米)。

(3) 预计导体宽度 B'

$$B' = \frac{A'_{Cu\,a} \times 10^{-2}}{H'} \quad (\text{厘米}) \tag{3-37}$$

式中 $A'_{Cu\,a}$——预计的导体截面积(毫米²),按式(3-21)得到。

(4) 预计槽宽 b'_s

$$b'_s = uB' + \delta_{ib} \tag{3-38}$$

式中 δ_{ib}——包括槽宽度方向的绝缘总厚、铜线弯曲及嵌线余隙、槽形公差等，以厘米为单位，可按表 3-7 或表 3-8 选取(注意表中单位为毫米)。

一般槽宽范围为(0.35～0.5)t_a 厘米。

(5) 校核齿根磁通密度

齿根处的齿距

$$t'_{a3} = \frac{\pi(D_a - 2h'_s)}{Z} \quad (\text{厘米}) \tag{3-39}$$

齿根处的齿宽

$$b'_{t3} = t'_{a3} - b'_s \quad (\text{厘米}) \tag{3-40}$$

齿根处的磁通密度

$$B_{t\,max} = \frac{t_a B_\delta l_\delta}{k_{Fe\,a} b'_{t3} l_{Fe}} \quad (\text{高斯}) \tag{3-41}$$

式中 l_{Fe}——电枢铁心净长(厘米),对无径向通风沟的铁心，$l_{Fe} = l_a = l_\delta$; 对有径向通风沟的铁心，$l_{Fe} = l_a - N_{vr}b_v = l_\delta - N_{vr}b_v$。

齿根处的磁通密度不应超过 24500 高斯。高速电机因磁通的交变频率较高,为了控制铁耗不要过大,齿根磁密的限值还宜低些。如果不符合上面的要求,应调整槽高重算。

(6) 选用线规

根据预计的导体宽度和高度,从附录 I 选用标准的导体尺寸。通常在同一机座号的电机中,导体高度要取得一致,以便统一槽的高度。导体高度确定后再相应地确定导体宽度。

(7) 确定槽高 h_s 和槽宽 b_s

根据所选导线尺寸及绝缘规范(见表 3-7 或表 3-8)，可以确定槽高和槽宽。当然，最后确定的槽宽仍应满足齿根处的磁通密度不超过限值，并且使齿部和轭部的磁通密度分配比较合理。

三、电枢轭及电枢内径尺寸

1. 电枢轭部尺寸

(1) 预定每极额定主磁通 Φ'_N

$$\Phi'_N=\frac{60E_N a\times10^8}{pN_a n_N}\quad(\text{麦})\tag{3-42}$$

而

$$E_N=k_E U_N\tag{3-43}$$

k_E 称电枢电路压降系数，电动机的 k_E 为 0.85～0.96；发电机的 k_E 为 1.14～1.04。电机的输出功率愈大，k_E 值愈接近于 1。

(2) 电枢的轭高 h_{ja} 和有效轭高 h_{jay}

预计的电枢轭高

$$h'_{ja}=\frac{\Phi'_N}{k_{Fea}l_{Fe}\times2B'_{ja}}\quad(\text{厘米})\tag{3-44}$$

式中 B'_{ja}——预计的电枢轭部磁通密度，对于 $2p=2$ 的小型电机，$B'_{ja}=12000\sim16000$ 高斯；对于 $2p=4$ 的小型电机，$B'_{ja}=11000\sim14000$ 高斯；对于中大型电机，$B'_{ja}=10000\sim15000$ 高斯。

根据 h'_{ja} 选定电枢内径 D_{ia}(见下面小节)，由 D_{ia} 就可以确定电枢轭的高度 h_{ja} 和有效高度 h_{jay}。

对于矩形槽、有圆形或半圆形轴向通风孔的情况：

$$h_{ja}=\frac{D_a-D_{ia}}{2}-h_s\quad(\text{厘米})\tag{3-45}$$

$$h_{jay}=\frac{D_a-D_{ia}}{2}-h_s-\frac{2}{3}d_v \quad (厘米) \qquad (3\text{-}46a)$$

或

$$h_{jay}=\frac{D_a-D_{ia}}{2}-h_s-\frac{2}{3}r_v \quad (厘米) \qquad (3\text{-}46b)$$

式中　d_v——圆形轴向通风孔的直径(厘米);

r_v——半圆形轴向通风孔的半径(厘米)。

式(3-46)右边部分中的$-\frac{2}{3}d_v$或$-\frac{2}{3}r_v$项，是考虑到通风孔对导磁的影响。小型电机的轴向通风孔数、通风孔径如表3-10所示。

表3-10　小型电机的轴向通风孔数、通风孔径

电枢直径 D_a (厘米)	19.5	24.5	29.4	32.7
圆形通风孔直径 d_v(厘米)	1.5			
半圆形通风孔半径 r_v(厘米)		1.2	1.5	1.5
通风孔数 N_v	6	20	20	20

对于梨形槽、无轴向通风孔的情况，h_{ja}与矩形槽的情况相同，即式(3-45)，而轭的有效高度为

$$h_{jay}=\frac{D_a-D_{ia}}{2}-h_s+\frac{1}{3}r_2 \quad (厘米) \qquad (3\text{-}47)$$

2. 电枢内径 D_{ia}

电枢内径 D_{ia} 在下面的范围内选定：

$$D_s \leqslant D_{ia}<(D_a-2h_s-2h'_{ja}) \quad (厘米) \qquad (3\text{-}48)$$

式中　D_s——轴径(厘米)，由机械计算确定。

小型电机的电枢冲片一般是直接压入转轴的，在这种情况下，$D_{ia}=D_s$。

3-5 换向器和电刷

一、换向器

1. 换向器直径 D_K

换向器直径 D_K 必须小于电枢外径 D_a，以便于电枢导体接到换向器上。小型电机为了获得尽可能多的换向片数，其换向器直径接近于电枢直径；大型电机为了降低换向器圆周速度，其换向器直径要选得小些。一般来说，

当 $D_a>50$ 厘米时，$D_K=(0.6\sim0.75)D_a$；

当 $20<D_a<50$ 厘米时，$D_K\leqslant(D_a-2h_s)$

对应于不同电枢外径的常用换向器直径尺寸见表 3-11。

表 3-11 常用换向器直径尺寸(单位: 厘米)

电枢直径 D_a	7.0	8.3	10.6	12.0	13.8	16.2	19.5
换向器直径 D_K	6.0	6.0	8.5	10.0	10.0	12.5	12.5/15.0
电枢直径 D_a	56	65	74	85	99	120	150
换向器直径 D_K	45	45/50	50/55	55	60/63.5	80	80/100
电枢直径 D_a	21.0	24.5	29.4	32.7	36.8	42.3	49.3
换向器直径 D_K	15.0	18.0	20.0	23.0	25.0/28.0	32.5	35.5
电枢直径 D_a	180	215	255	285	315	350	380
换向器直径 D_K	100/130	130/160	160/190	190	220	220	250

2. 换向器片数 K

$$K=uZ \tag{3-49}$$

3. 换向器片间的平均电压 U_{Kav}

换向器的相邻换向片之间的电压不能太高，否则会引起电位差火花及环火。片间的最高电压 $U_{K\max}$ 正比于电机负载

运行时的气隙最大磁通密度，这个气隙最大磁通密度和电枢的电负荷、气隙的长度以及电枢齿、磁极的饱和程度有关，所以片间的最高电压不易精确算出。由于这个缘故，往往用片间的平均电压 U_{Kav} 来推测 $U_{K\max}$。片间的平均电压

$$U_{Kav}=\frac{2pU_N}{K} \quad (伏) \tag{3-50}$$

根据生产实践的经验，用来衡量电机的换向，U_{Kav} 有如下的限值：

无补偿绕组电机，$U_{Kav}<17$ 伏；

有补偿绕组电机，$U_{Kav}<22$ 伏。

当 U_{Kav} 不符合上述要求时，应适当增加换向片数 K。

4．换向器片距 t_K

$$t_K=\frac{\pi D_K}{K}=\beta_i+\beta_K \quad (厘米) \tag{3-51}$$

式中 β_i——云母片的厚度，一般为 0.06～0.1 厘米；

β_K——换向片的厚度，应使铣槽后的最薄处不小于 0.04 厘米，如图 3-15 所示。

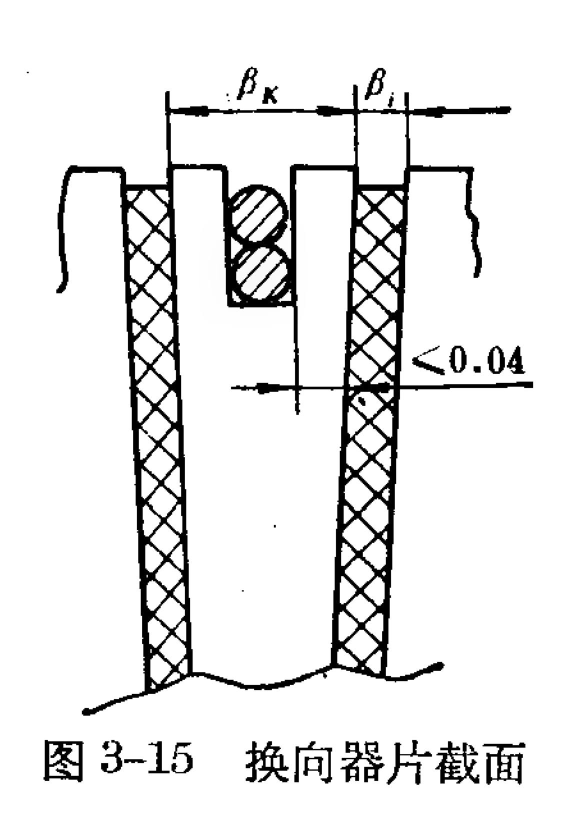


图 3-15　换向器片截面

按结构和工艺的要求，t_K 宜符合下列要求：

当 $D_K<20$ 厘米时，$t_K>0.3$ 厘米；

当 $D_K>20$ 厘米时，$t_K>0.45$ 厘米。

5．换向器的圆周速度 v_K

$$v_K=\frac{\pi D_K n_{\max}}{6000} \quad (米/秒) \tag{3-52}$$

当换向器的圆周速度大于 30～40 米/秒时，应采用特殊

结构的换向器。

6．换向器长度

按下面小节所确定的每根刷杆的电刷数 N_b、电刷宽度 l_b、可以算出换向器长度。考虑到每一刷杆上相邻电刷间要保持 0.5 厘米的距离，电刷距换向器边缘也不应小于 0.5 厘米，相邻刷杆上的电刷要错位排列等要求，换向器长度 l_K 可按下式计算：

$$l_K = N_b(l_b + 0.5) + (1.0 \sim 2.5) \quad (厘米) \qquad (3\text{-}53)$$

相邻刷杆上的电刷在换向器长度的方向上所以要相互错位排列，目的是为了使换向器表面磨损均匀。

二、电刷

电刷的选择对电机换向时抑制火花有重要的作用，应按功率、电压、负载性质及换向器圆周速度等条件选用。一般常用电化石墨电刷，按原料配比不同，又可分石墨基、焦碳基、碳黑基等。碳黑基的电阻系数和接触压降较高，宜用于换向困难的电机；石墨基则常用于换向正常的电机。此外，金属石墨电刷的电阻系数和接触压降较低，宜用于低电压大电流电机。各类电刷的性能和工作条件可参考附录 III，电刷的尺寸见图 3-16 和表 3-12。

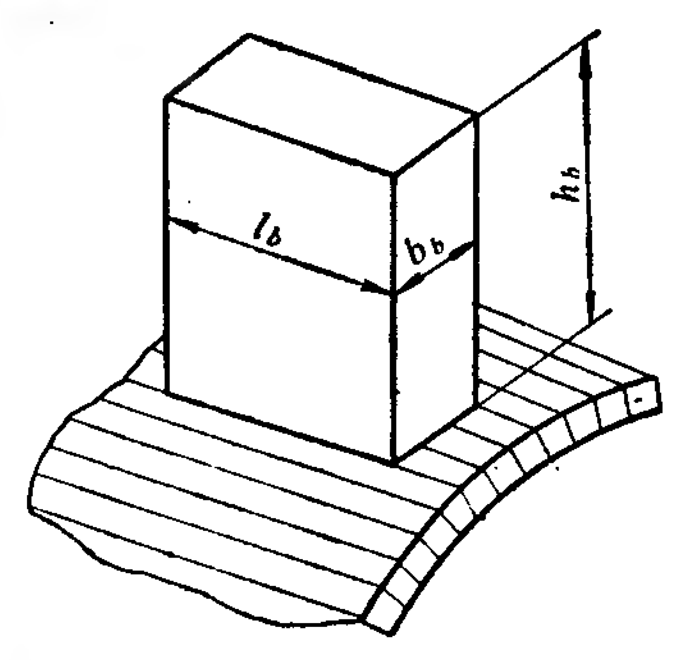


图 3-16　换向器上的电刷

1．电刷的宽度

电刷所覆盖的换向片数至少应保证电刷能与 m 重绕组的支路相联，即应使电刷的宽度

$$b_b > mt_K \qquad (3\text{-}54)$$

式中　m——绕组的复倍系数。

电刷宽度应选择适当。如果 b_b 较小，则 l_b 要较长，或使电刷数 N_b 较多，于是需要相应增加换向器的长度；如果 b_b 较大，则使换向区域宽度增大，有利于换向(见第四章)，但却导致极弧系数减小。一般是在换向区域宽度允许的条件下，尽量选较宽的电刷。对于宽度大于 2 厘米的电刷，常用并块电刷或分层电刷，以改善换向。

2．电刷的长度 l_b

电刷的长度 l_b 也要选择适当。如果 l_b 较短，能使电刷与换向器可靠地接触，也有利于散热，但是要增加电刷数 N_b。对于直流电机所常用的电刷，其宽度与长度有标准尺寸，见表 3-12。

表 3-12　常用的电刷尺寸(单位：毫米)

电刷宽度 b_b	4	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32
电刷长度 l_b	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32	40
	10	8	10	12.5	16	20	25	32	40	50
		10	12.5	16	20	25	32	40	50	
		12.5	16	20	25	32	40	50		
			20	25	32	40	50			
				32	40	50				

3．每根刷杆上的电刷数 N_b

在刷杆数等于极数时，每根刷杆上的电刷数

$$N_b=\frac{I_a}{p b_b l_b J_b} \tag{3-55}$$

式中　J_b——电刷中的电流密度，根据所用电刷牌号按附录 III 选取。对于电化石墨电刷，常取 $J_b<12$ 安/厘米^2。

第四章　换　　向

4-1　概　　述

在电枢旋转的过程中，当某一元件被电刷短接从绕组的一条支路转移到另一条支路时，其中的电流将由原来的方向改变到相反的方向，见图 4-1 和图 4-2。绕组元件在被电刷短接期间的电流变化过程称为换向。换向过程中被电刷短接的元件称为换向元件。叠绕组和波绕组的换向过程在本质上并无差别，所不同的仅是叠绕组中换向元件被同一组电刷短接；而在波绕组中，当刷杆数等于极数时，换向元件被两组相同极性的电刷短接。换向元件从换向开始到结束所经历的时间叫做换向周期 T_K。换向周期通常是很短的。

在换向的过程中，如果电刷与换向器之间始终保持接触良好，电刷的压力适当，同时换向的元件中没有较大的附加电

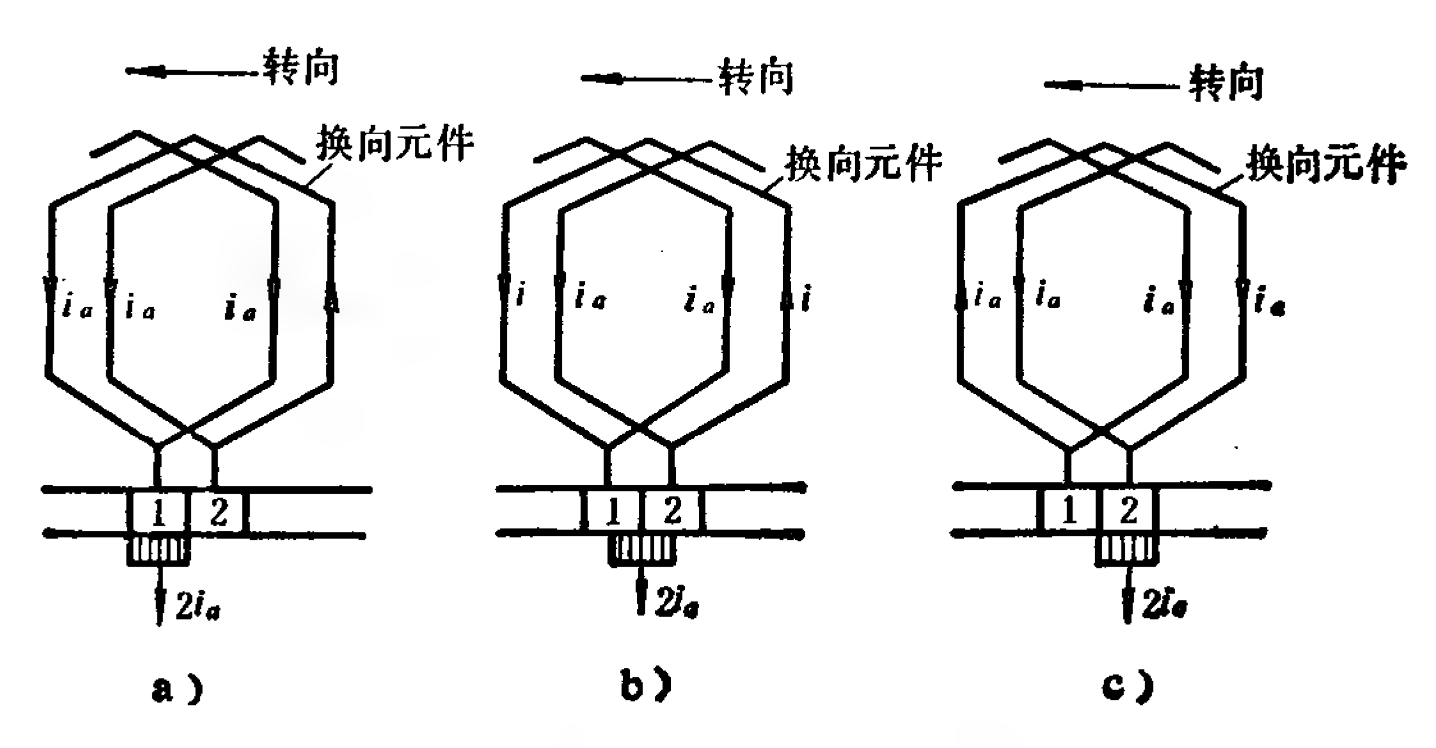


图 4-1　换向过程示意

a) 换向开始　b) 换向在进行中　c) 换向结束

动势，那末，换向元件中的电流将由一个方向平稳地改变到另一个方向，在电刷下没有火花，或者在电刷下的很小范围内有微弱的火花(通常呈蓝色)，这种情况对电机运行没有危害，称为换向良好。反之，如果电刷与换向器之间接触不良，或者电刷的压力不当，或者换向元件中有很大的附加电动势，那末，换向元件中的电流变化剧烈，这时在电刷下发生较大或强烈的火花(通常呈红色、白色，甚至形成火舌、电弧等)，这种情况将会灼伤电刷和换向器，称为换向不良。

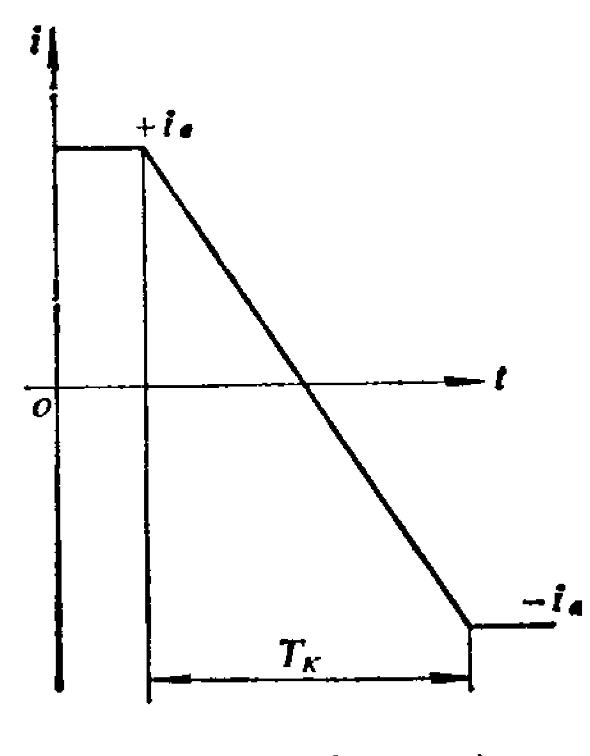


图 4-2　换向元件中电流的变化

换向不良将导致电机不能正常运行，因此换向性能是直流电机运行质量的重要指标。造成换向不良有多方面原因，主要有机械、化学、工作条件和电磁四方面的原因，这些原因往往同时存在，而且彼此之间有影响。机械原因有多种多样，如换向器表面不光滑、不圆整，换向器跳动，电刷在刷握中跳动或电刷接触面研磨得不好等，结果导致电刷与换向器表面的滑动接触不好。针对这些机械原因在制造时可采取相应的措施予以改善。化学原因主要是指在换向器表面上一层具有褐色光泽的氧化亚铜薄膜受到破坏或不易形成，这可选用合适的电刷或调整电刷的压力来加以解决。工作条件原因主要是指电机工作在环境条件较差(如振动较大，或尘埃、盐雾、化学气体较多)的地方，或电机运行时负载变化剧烈等，针对这些原因可从结构和设计方面加以注意。电磁原因是指换向元件中存在附加电动势，导致换向电流变化剧烈，这应在设计时

予以考虑，试验时再作适当调整。

所以，在进行电磁设计时，为了要获得满意的换向，主要是针对负载变化剧烈和附加电动势问题采取某些措施。由负载变化剧烈所造成的换向火花或环火，可采用装置补偿绕组和采用叠片机座、叠片换向极结构加以消除；而由换向元件中的附加电动势所造成的换向火花，可采用装置换向极来解决。本章的内容主要是阐述附加电动势、换向极、换向极绕组和补偿绕组的计算、设计。

4-2 换向元件中的电动势和电流

一、电抗电动势与旋转电动势

在换向过程中，换向元件受到某些磁场的作用会产生两种电动势，一种叫做电抗电动势，另一种叫做旋转电动势。

1．电抗电动势 e_r

绕组元件中通过电流时，在元件的周围(槽部、端部和齿顶部)将产生漏磁通。在换向时，换向元件的电流 i 由 $+i_a$ 向 $-i_a$ 变化，漏磁通也随之而改变，这个随时间而变化的漏磁通在换向元件中就感应出电动势，称为电抗电动势。电抗电动势仅在换向周期内存在，当换向电流变动的幅值越大，或换向周期越短，电抗电动势就越大。电抗电动势包括某一个换向元件本身的自感电动势和同时进行换向的其他元件对它产生的互感电动势。根据电磁感应定律可以判定，电抗电动势的方向与换向元件在换向前的电流方向相同，它的作用是阻挠换向元件中电流的变化，不利于换向。

2．旋转电动势 e_s

换向元件在换向区域气隙磁场中旋转时，所感应的电动势称为旋转电动势。在不装换向极的情况下，换向区域内的

气隙磁场是由交轴电枢反应磁动势所产生的；在装置换向极的情况下，这个磁场是由交轴电枢反应磁动势和换向极磁动势共同产生的。换向极的磁动势比交轴电枢反应磁动势大，而且它们的方向相反，所以由这两个磁动势共同产生的磁场的方向与单独由交轴电枢反应磁动势所产生的磁场相反。旋转电动势的方向取决于磁场的极性和转向，根据右手定则可以判定，在不装换向极时，e_s 的方向与换向前的电流方向相同，即与电抗电动势的方向相同，不利于换向。在有换向极时，e_s 的方向恰相反，e_s 的作用将加速电流的变化，有利于换向。

换向元件中的电抗电动势 e_r 和旋转电动势 e_s 的合成用 Σe 表示。现在取元件换向前的电流方向为换向元件回路的参考方向，与参考方向相同的电动势取正值，相反的取负值，因此 e_r 总是正值，e_s 可能是正值（当不装换向极时），也可能是负值（当装有换向极时），从而对 Σe 来说得到三种情况：即 $\Sigma e>0$，$\Sigma e=0$ 和 $\Sigma e<0$。

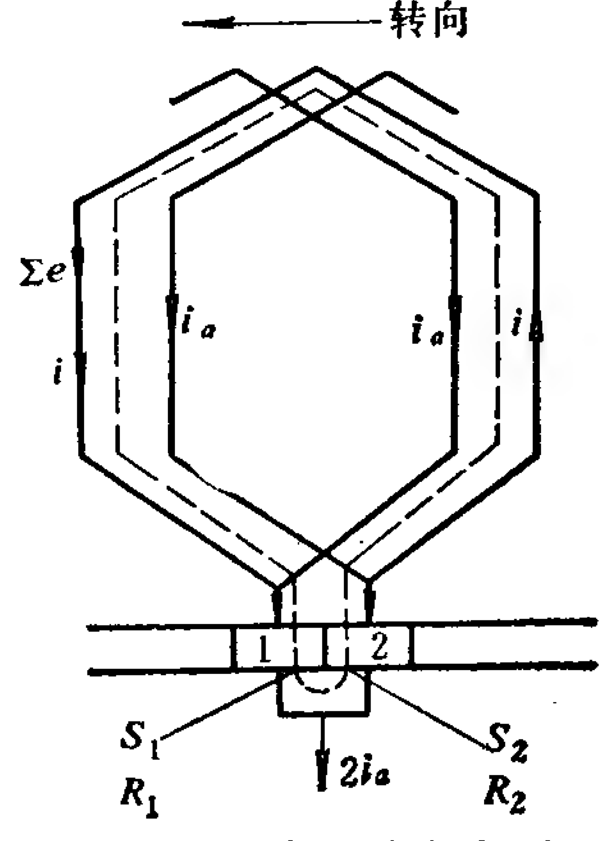


图 4-3　换向元件和电刷构成的闭合回路

二、换向元件中的电流

图 4-3 所示换向元件回路中，若元件及其引线的电阻忽略不计，假定电刷接触电阻与接触面积成反比，并以 R_1、R_2 分别表示电刷与换向片 1、2 的接触电阻，则换向元件回路的电压平衡方程式为

$$(i_a+i)R_1-(i_a-i)R_2=\Sigma e \tag{4-1}$$

表 4-1　换向元件中三种不同换向电流的变化类型及其特征

换向类型	线性换向	延迟换向	超越换向
电流变化规律	$\Sigma e=0$ $i_K=0,\ i=i_l$	$\Sigma e>0$ $i_K>0,\ i=i_l+i_K$	$\Sigma e<0$ $i_K<0,\ i=i_l+i_K$
特征	(1) $t=\frac{T_K}{2}$ 时，$i=0$。 (2) 前后刷边的电流密度相等 (3) 电刷下不易产生火花 (4) 换向元件的电流所产生的磁动势只有交轴分量	(1) $t>\frac{T_K}{2}$ 时，$i=0$，即电流改变方向的时刻比线性换向迟 (2) 后刷边电流密度大于前刷边电流密度 (3) 过度的延迟换向在后刷边常出现火花 (4) 换向元件的电流所产生的磁动势除交轴分量外还有直轴分量，后者使发电机去磁，电动机增磁	(1) $t<\frac{T_K}{2}$ 时，$i=0$ 即电流改变方向的时刻比线性换向早 (2) 前刷边电流密度大于后刷边电流密度 (3) 过度的超越换向在前刷边常出现火花 (4) 换向元件的电流所产生的磁动势除交轴分量外还有直轴分量，后者使发电机增磁，电动机去磁

由于

$$R_1=R\frac{T_K}{T_K-t}$$

和

$$R_2=R\frac{T_K}{t}$$

式中　R——电刷与某一换向片全部接触时的接触电阻；

t——从换向开始起算的时间。

可解得元件中的电流

$$i=i_a\frac{T_K-2t}{T_K}+\frac{\Sigma e}{R}\frac{1}{\left(\frac{T_K}{t}+\frac{T_K}{T_K-t}\right)}=i_l+i_K \text{（安）} \quad (4\text{-}2)$$

上式中 $i_l=\frac{T_K-2t}{T_K}i_a$，它和时间 t 成直线关系，称为线性换向电流；$i_K=\frac{\Sigma e}{R}\frac{1}{\left(\frac{T_K}{t}+\frac{T_K}{T_K-t}\right)}$，是由 Σe 所产生的电流，称为附加换向电流。

根据 $\Sigma e=0$，$\Sigma e>0$ 和 $\Sigma e<0$ 三种情况，其换向电流和换向特征如表 4-1 所示。

4-3 电抗电动势的计算

电抗电动势的计算比较复杂，现在先从一个简单的例子了解公式的推导过程和公式中各部分的意义，然后再对一般情况下的计算公式进行必要的分析和说明。

一、电抗电动势计算举例

例如有一台直流电机，整距绕组，$u=1$，$b_b=t_K$，矩形槽，$l_{Fe}=l_\delta$。根据电磁感应定律，换向元件的电抗电动势为

$$e_r=-L_r\frac{di}{dt} \quad \text{（伏）} \quad (4\text{-}3)$$

式中 L_r——换向元件的漏磁通电感系数（亨）。

在一般情况下，i 和 t 的关系不是线性的，$\frac{di}{dt}$ 在不同时刻有不同数值，式(4-3)表示 e_r 的瞬时值。但是，鉴于换向电流 i 随时间 t 的变化关系相当复杂，计算 e_r 的瞬时值不是可取的方法，所以用 e_r 在整个换向周期 T_K 中的平均值来近似代替。e_r 的平均值是

$$e_r = \frac{1}{T_K}\int_0^{T_K}\left(-L_r\frac{di}{dt}\right)dt$$

$$= \frac{1}{T_K}\int_{+i_a}^{-i_a}(-L_r)di = L_r\frac{2i_a}{T_K} \quad (4\text{-}4)$$

这也就是说，现在是按线性换向来处理，因为在线性换向时，$i = i_a\left(1-\frac{2t}{T'_K}\right)$，得 $\frac{di}{dt} = -\frac{2i_a}{T_K}$。

换向周期 T_K 可以这样计算

$$T_K = \frac{\pi D_a}{v_a K}\times 10^{-2} \quad (\text{秒}) \quad (4\text{-}5)$$

式中 D_a——电枢直径(厘米)；

v_a——电枢圆周速度(米/秒)。

因此，现在计算 e_r 的主要问题在于如何求出 L_r。换向元件的漏磁通可分为三部分，即槽漏磁通、齿顶漏磁通和端部漏磁通，分别如图 4-4a)、b)、c)所示。对应于这三部分漏磁通，换向元件的漏电感 L_r 也由槽漏电感 L_s、齿顶漏电感 L_t 和端部漏电感 L_E 三部分组成。

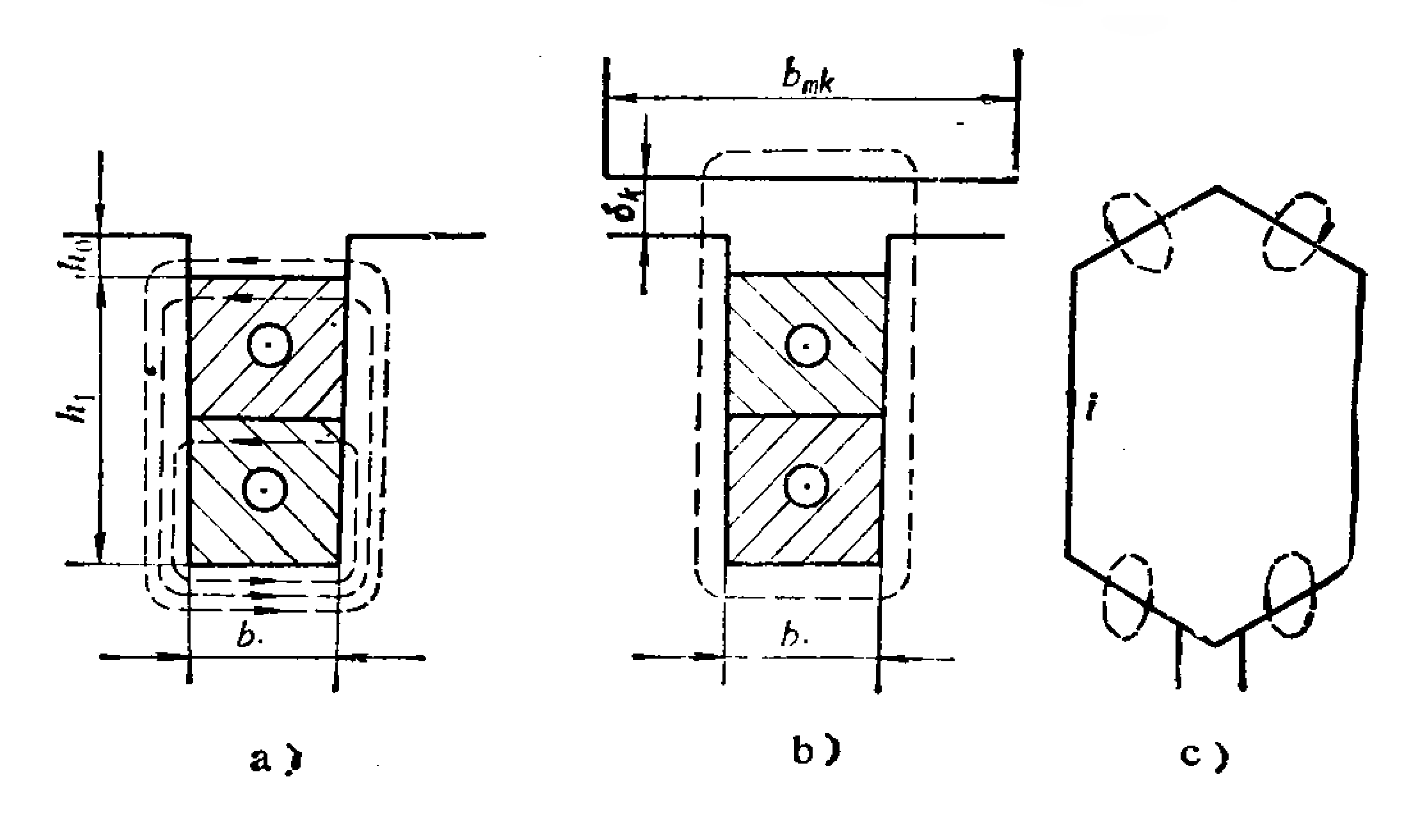


图 4-4　换向元件的漏磁通

a) 槽漏磁通　b) 齿顶漏磁通　c) 端部漏磁通

槽漏电感 L_s 的推导说明如下。如图 4-5 所示，由于假定绕组是整距的，故槽内上、下层元件边同时换向，这样，所研究的换向元件不仅有自感，还有其他同时换向的元件对它的互感。换向元件的槽漏电感应等于该元件的上层边自感 L_{11}、下层边对它的互感 M_{12}、该元件的下层边自感 L_{22} 和上层边对它的互感 M_{21} 四者之和。

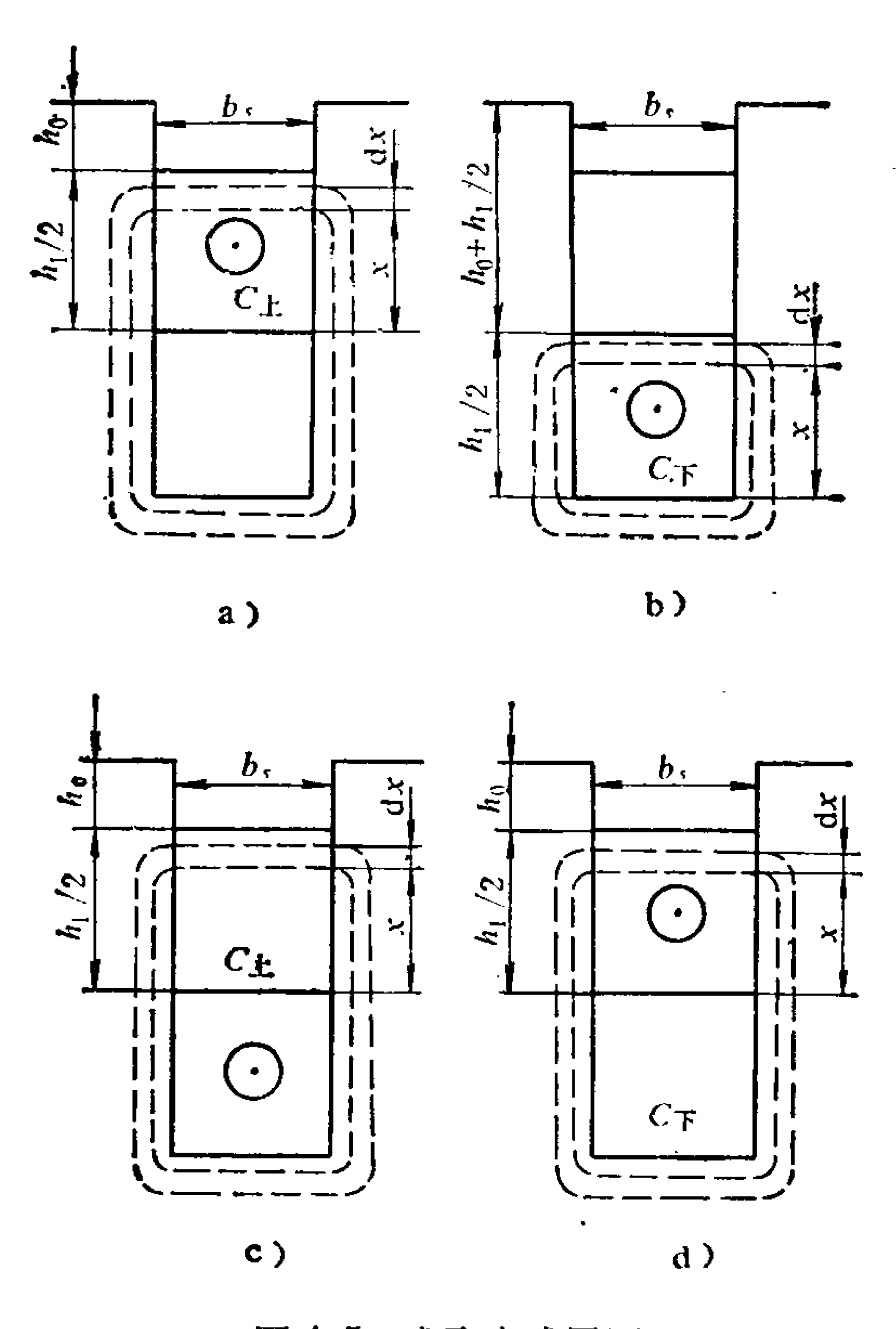


图 4-5　求取电感用图

a) 求 L_{11}　b) 求 L_{22}　c) 求 M_{12}　d) 求 M_{21}

($C_上$、$C_下$ 指换向元件 C 的上层边和下层边)

(1) 上层边自感 L_{11}

在 h_0 高度内，作用的磁动势为 iW_a，磁动势为 $\mu_0\frac{l_\delta h_0}{b_s}$，磁通为 $iW_a\mu_0\frac{l_\delta h_0}{b_s}$，磁链为 $W_a iW_a\mu_0\frac{l_\delta h_0}{b_s}$，也就是

$$i\mu_0 W_a^2 l_\delta \frac{h_0}{b_s}$$

在上层边所在的 $\frac{h_1}{2}$ 高度内，取一条高为 dx、距上层边底线为 x 的磁力管，如图 4-5a)所示。作用在这条磁力管上的磁动势为 $iW_a\frac{x}{h_1/2}$，这条磁力管的磁导为 $\mu_0\frac{l_\delta dx}{b_s}$，因此磁通为 $iW_a\frac{x}{h_1/2}\mu_0\frac{l_\delta dx}{b_s}$，磁链为

$$W_a\frac{x}{h_1/2}iW_a\frac{x}{h_1/2}\mu_0\frac{l_\delta dx}{b_s}, \quad \text{即}\ i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{x}{h_1/2}\right)^2\frac{dx}{b_s}。$$

在 $\frac{h_1}{2}$ 高度内总磁链为

$$\int_0^{h_1/2} i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{x}{h_1/2}\right)^2\frac{dx}{b_s} = i\mu_0 W_a^2 l_\delta\frac{h_1/2}{3b_s}$$

上层边全部的总磁链 ψ_{11} 等于 h_0 高度内的磁链与 $h_1/2$ 高度内的磁链之和：

$$\psi_{11} = i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s} + \frac{h_1/2}{3b_s}\right) \tag{4-6}$$

上层边自感

$$L_{11} = \frac{\psi_{11}}{i} = \mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s} + \frac{h_1/2}{3b_s}\right) \tag{4-7}$$

(2) 下层边自感 L_{22}

用同样的方法可以求出下层边的总磁链 ψ_{22} 和自感 L_{22}

$$\psi_{22} = i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0 + h_1/2}{b_s} + \frac{h_1/2}{3b_s}\right) \tag{4-8}$$

$$L_{22}=\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0+h_1/2}{b_s}+\frac{h_1/2}{3b_s}\right) \tag{4-9}$$

(3) 下层边对上层边的互感 M_{12}

在 h_0 高度内，磁链仍为 $i\mu_0 W_a^2 l_\delta \dfrac{h_0}{b_s}$。

在上层边所在的 $\dfrac{h_1}{2}$ 高度内，取一条高为 dx、距上层边底线为 x 的磁力管，如图 4–5c)所示。作用在这条磁力管上的磁动势为 iW_a，这条磁力管的磁导为 $\mu_0\dfrac{l_\delta dx}{b_s}$，因此磁通为 $iW_a\mu_0\dfrac{l_\delta dx}{b_s}$，磁链为 $W_a\dfrac{x}{h_1/2}iW_a\mu_0\dfrac{l_\delta dx}{b_s}$，即 $i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\dfrac{x}{h_1/2}\right)\dfrac{dx}{b_s}$。在 $h_1/2$ 高度内总磁链为：

$$\int_0^{h_1/2} i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{x}{h_1/2}\right)\frac{dx}{b_s}=i\mu_0 W_a^2 l_\delta\frac{h_1/2}{2b_s}$$

下层边对上层边的总磁链

$$\psi_{12}=i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\right) \tag{4-10}$$

下层边对上层边的互感

$$M_{12}=\frac{\psi_{12}}{i}=\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\right) \tag{4-11}$$

(4) 上层边对下层边的互感 M_{21}

用同样的方法可求出上层边对下层边的总磁链 ψ_{21} 和互感 M_{21}:

$$\psi_{21}=i\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\right) \tag{4-12}$$

$$M_{21}=\mu_0 W_a^2 l_\delta\left(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\right) \tag{4-13}$$

换向元件的槽漏电感

$$
\begin{aligned}
L_s &= L_{11}+L_{22}+M_{12}+M_{21} \\
&= \mu_0 W_a^2 l_\delta \Big[\Big(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{3b_s}\Big) \\
&\quad +\Big(\frac{h_0+h_1/2}{b_s}+\frac{h_1/2}{3b_s}\Big) \\
&\quad +\Big(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\Big)+\Big(\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1/2}{2b_s}\Big)\Big] \\
&= \mu_0 W_a^2 l_\delta\Big(4\frac{h_0}{b_s}+4\frac{h_1}{3b_s}\Big) \\
&= 2\mu_0 W_a^2 l_\delta \times 2\lambda_s
\end{aligned}
\tag{4-14}
$$

而

$$
\lambda_s=\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1}{3b_s} \tag{4-15}
$$

λ_s 称为槽漏磁导系数，式(4-15)是根据矩形槽得出的。

齿顶漏电感 L_t 可用下式计算

$$
L_t=2\mu_0 W_a^2 l_\delta \times 2\lambda_t \tag{4-16}
$$

而

$$
\lambda_t=0.15\frac{b_{pK}}{k_{\delta K}\delta_K} \tag{4-17}
$$

式中 b_{pK}——换向极极靴宽度(厘米)；

$k_{\delta K}$——换向极气隙系数；

δ_K——换向极气隙(厘米)。

λ_t 称为齿顶漏磁导系数。式(4-17)是根据中、小型电机有换向极的情况下得出的。

端部漏电感 L_E 可用下式计算

$$
L_E=2\mu_0 W_a^2 l_E \lambda'_E \tag{4-18}
$$

式中 λ_E——端部漏磁导系数，根据经验取 0.75。

式(4-18)和式(4-14)、(4-16)相比较，在形式上有两点不同：一是在式(4-18)中采用端部长度 l_E 而不是槽部长度 l_δ，这是因为端部漏磁通是沿 l_E 分布的；二是在式(4-18)中 λ'_E 前没

有数字2，这是因为在端部上、下层之间没有互感。为了使各式在形式上一致，式(4-18)可改写成如下形式

$$L_E = 2\mu_0 W_a^2 l_\delta \lambda_E \tag{4-19}$$

而

$$\lambda_E = \lambda'_E \frac{l_E}{l_\delta} = 0.75 \frac{l_E}{l_\delta} \tag{4-20}$$

最后可得到换向元件的漏电感 L_r

$$\begin{aligned} L_r &= L_s + L_t + L_E \\ &= 2\mu_0 W_a^2 l_\delta [2(\lambda_s + \lambda_t) + \lambda_E] \end{aligned} \tag{4-21}$$

把 $\mu_0 = 0.4\pi \times 10^{-8}$ 亨/厘米代入式(4-21)，并令

$$\xi = 0.4\pi [2(\lambda_s + \lambda_t) + \lambda_E] \tag{4-22}$$

则得

$$L_r = 2W_a^2 l_\delta \xi \times 10^{-8} \quad (\text{亨}) \tag{4-23}$$

把 L_r 的计算公式(4-23)和 T_K 的计算公式(4-5)代入式(4-4)，可得电抗电动势

$$\begin{aligned} e_r &= L_r \frac{2i_a}{T_K} = 2W_a^2 l_\delta \xi \times 10^{-8} \times \frac{2i_a}{\dfrac{\pi D_a}{v_a K} \times 10^{-2}} \\ &= 2W_a v_a \frac{W_a K \times 2i_a}{\pi D_a} l_\delta \xi \times 10^{-6} \quad (\text{伏}) \end{aligned}$$

由于 $2W_a K$ 表示电枢总导体数，i_a 表示支路电流，所以，$\dfrac{W_a K \times 2i_a}{\pi D_a}$ 就是电负荷 A，于是

$$e_r = 2W_a v_a A l_\delta \xi \times 10^{-6} \quad (\text{伏}) \tag{4-24}$$

二、一般情况下的电抗电动势计算

换向元件的电抗电动势为其本身的漏磁自感电动势与其他同时进行换向的元件对它所感应的漏磁互感电动势之和，即

$$e_r = -(L + \Sigma M) \frac{di}{dt} = -L_r \frac{di}{dt} \tag{4-25}$$

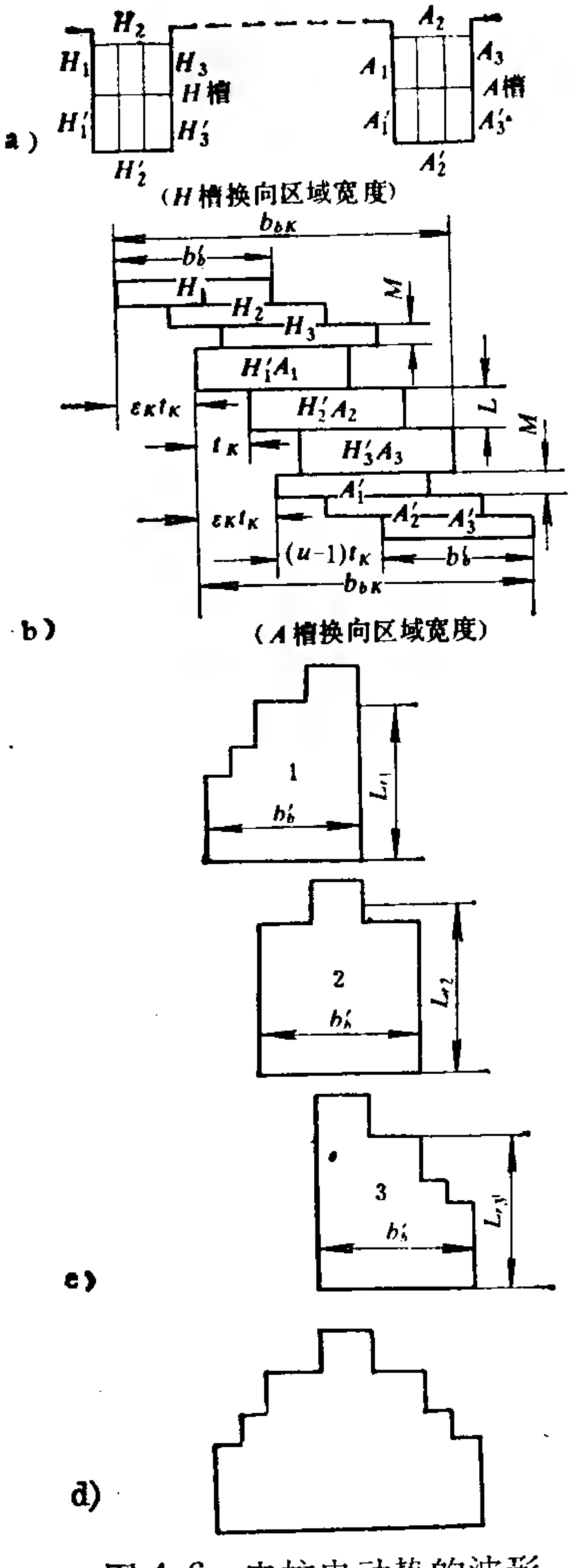


图 4-6 电抗电动势的波形

a) 处于换向区域的元件 b) 发生自感和互感的先后关系 c) 各元件的电抗电动势波形 d) 槽内各元件进行换向时的电抗电动势波形

式中 L_r——合成漏磁电感系数。

在 $u>1$ 的情况下，同槽的各个换向元件之间存在漏磁互感。同槽的各个换向元件的电抗电动势如图 4-6 所示。在图 4-6a) 中表示 H、A 两槽处于换向区域，$u=3$，$H_1'A_1$、$H_2'A_2$、$H_3'A_3$ 各自组成元件。当 $H_1'A_1$ 进行换向时，这个元件的自感系数为 L，从换向开始到结束电刷对换向器的相对位移为 b_{bc}'。由于同槽同层各元件边以一个换向器片距 t_K 为间隔依次换向，所以 $H_1'A_1$、$H_2'A_2$、$H_3'A_3$ 的自感系数彼此错开 t_K 距离，如图 4-6b) 所示，而它们在同时进行换向的时刻相互间有互感影响。在绕组短距的情况下，同槽的上下层对应元件边不是同时进行换

向，而是错开 $\varepsilon_K t_K$ 的间距，所以 H 槽和 A 槽的上下层对应元件边的互感系数 M 彼此错开 $\varepsilon_K t_K$，亦如图 4-6b)所示。就某一个换向元件如 H'_1A_1 元件，在它的换向周期内，其电抗电动势应该是自感电动势和各互感电动势之和，其互感包括 H'_2A_2、H'_3A_3 对它的互感，H 槽上层元件边对它的互感和 A 槽下层元件边对它的互感，由于各个互感发生的时刻有先后，所以其合成的漏电感系数 L_r 就不是常值。对于同槽的各换向元件，由于互感情况不同，L_r 的变化规律也不一致。若 $\frac{di}{dt}=$常数，H'_1A_1、H'_2A_2、H'_3A_3 的电抗电动势波形如图 4-6c)所示。在某一个槽内各元件进行换向时，其电抗电动势波形如图 4-6d)所示。

所以，在一般情况下，L_r 随时间而变，L_r 随不同元件而异。即使把换向电流作为线性变化来处理，即 $\frac{di}{dt}=$常数，e_r 的变化规律仍然很复杂。为了便于计算，一台直流电机的电抗电动势通常取为同槽 u 个换向元件平均电抗电动势的平均值。若以 L_{r1}、L_{r2}、…、L_{ru} 分别表示同槽 u 个换向元件合成漏磁电感的平均值(见图 4-6c))，则合成漏磁电感平均值的平均值为

$$L_R=\frac{1}{u}(L_{r1}+L_{r2}+\cdots+L_{ru})$$

从 L_R 可以求出平均电抗电动势。

L_R 的表达虽然比较复杂，电抗电动势仍可照上面导出的公式进行计算，即

$$e_r=L_R\frac{2i_a}{T_K}=2W_a v_a A l_\delta \xi\times10^{-6}\ (\text{伏}) \qquad (4\text{-}26)$$

式中　W_a——电枢每个元件的匝数；

v_a——电枢的圆周线速度(米/秒);

A——电负荷(安/厘米);

l_δ——电枢计算长度(厘米);

ξ——换向元件的平均漏磁导系数。

换向元件的平均漏磁导系数ξ按下式计算

$$\xi=0.4\pi\left[\frac{k_\beta}{2\beta_j}(\lambda_s+\lambda_t)\frac{l_{Fe}}{l_\delta}+\lambda_E\right] \tag{4-27}$$

式中 β_j——在换向周期内电刷覆盖的换向片数计算值;

k_β——对电抗电动势两次取平均值的计算过程中所引入的系数,称为互感短距系数;

l_{Fe}——铁心净长(厘米);

λ_s——槽漏磁导系数;

λ_t——齿顶漏磁导系数;

λ_E——端部漏磁导系数。

为了计算ξ,对β_j、k_β、λ_s、λ_t和λ_E再逐项进行讨论。

电刷覆盖的换向片数计算值

$$\beta_j=\frac{b_b'}{t_K} \tag{4-28}$$

式中 b_b'——在换向周期内电刷与换向器的相对位移,称为电刷计算宽度(厘米);

t_K——换向器片距(厘米)。

而

$$b_b'=b_b-\beta_i+\left(1-\frac{a}{p}\right)t_K \quad (厘米) \tag{4-29}$$

式中 b_b——电刷宽度(厘米);

β_i——换向器片间绝缘厚度(厘米)。

无论是叠绕组或波绕组,b_b'的计算式是一样的,见图4-7。

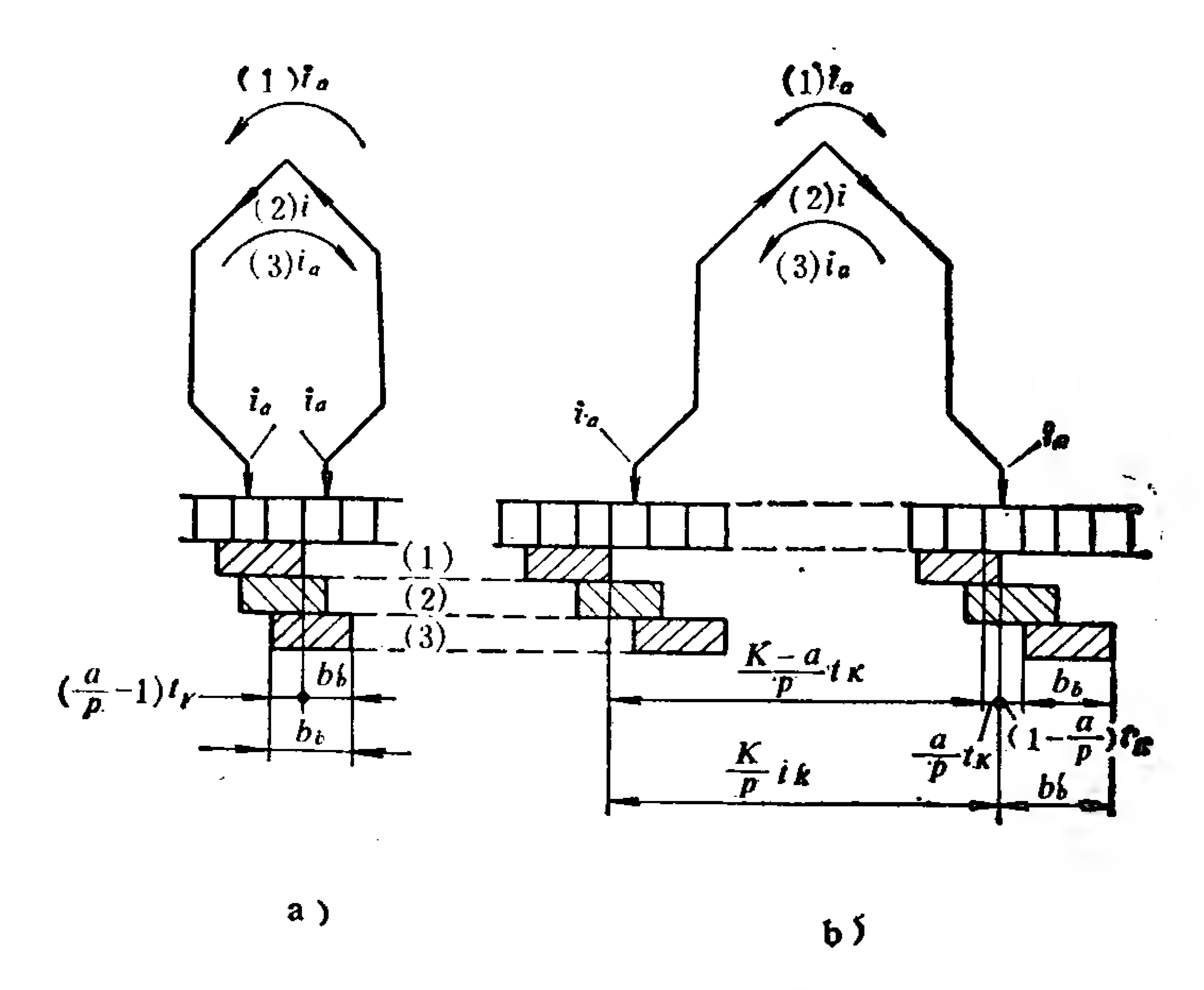


图 4-7 在换向周期内电刷与换向器的相对位移

a) 叠绕组情况 b) 波绕组情况

互感短距系数 k_β 的值与每槽每层并列的元件边数 u、电刷覆盖的换向片数计算值 β_j 和节距缩短数 ε_K 有关，而

$$\varepsilon_K=\frac{K}{2p}-y_1$$

对于常用的同槽式绕组，k_β 的数值可以从图 4-8 按 β_j、ε_K 和 u 查得，也可以从下面的公式计算：

$$k_\beta=2+\frac{4}{u\beta_j}\sum_{n=1}^{+}(u-n)(\beta_j-n)+\frac{2}{u\beta_j}[u(\beta_j-|\varepsilon_K|)+$$
$$+\sum_{n=1}^{+}(u-n)(\beta_j-|\varepsilon_K-n|)+\sum_{n=1}^{+}(u-n)(\beta_j-|\varepsilon_K+n|)] \tag{4-30}$$

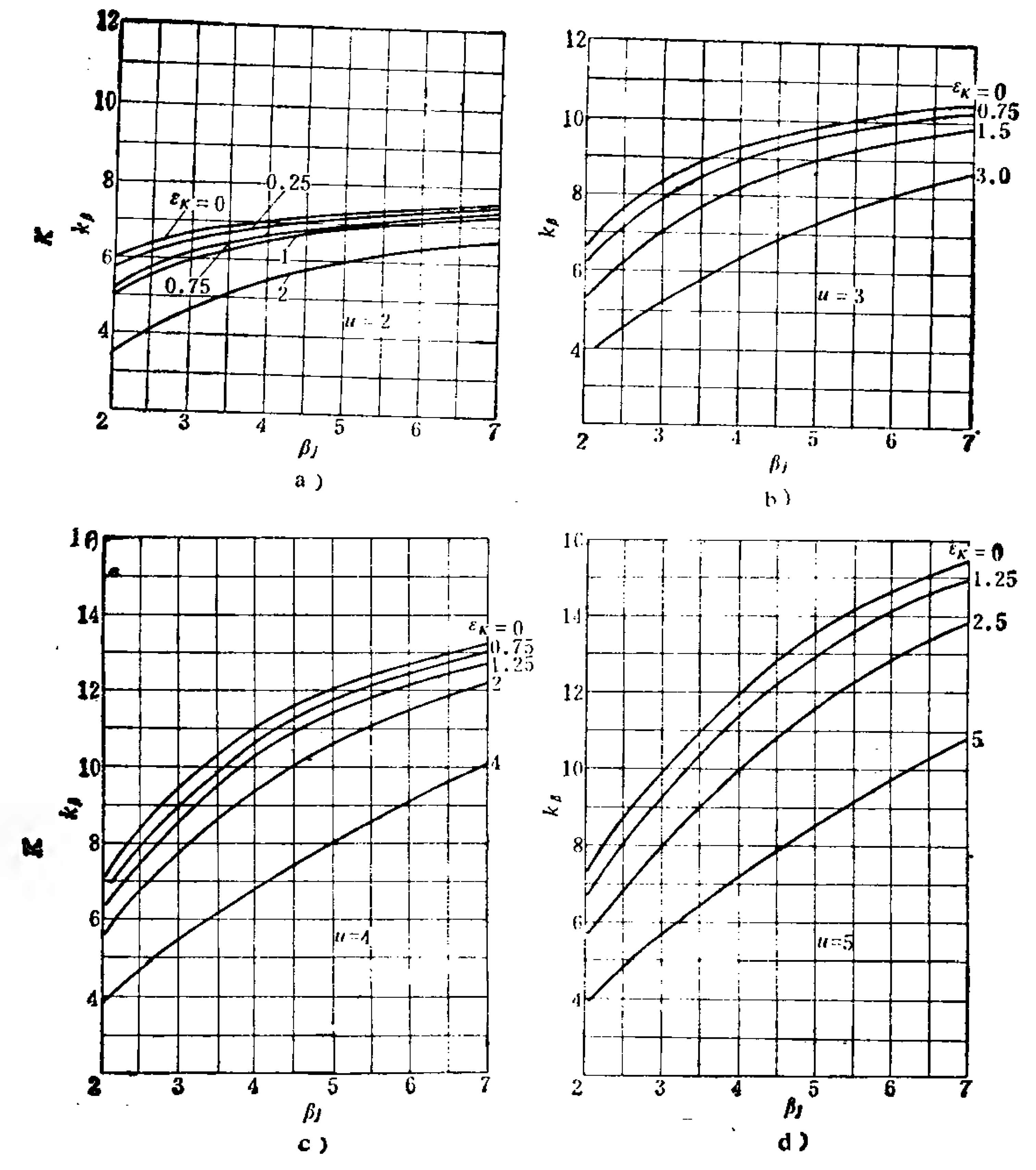


图 4-8　互感短距系数 k_β 与 β_j、u、ε_K 的关系

式中，$(\quad)_+$ 表示该项仅取正值，若为负值则不计；$\sum\limits_{n=1}^{+}$ 表示 $n=1$、2、… 时累加，但仅计算到圆括号内为正值项为止，负值项不计。

顺便指出，在上面推导的简单例子中，可以算得 $\beta_j=1$，$k_\beta=4$，把它们代入式(4-27)，就是前面所得到的式(4-22)。

槽漏磁导系数 λ_s

对于梨形槽,

$$\lambda_s=\frac{h_0}{b_0}+\frac{h_1}{3(r_1+r_2)}+0.623 \tag{4-31}$$

对于矩形槽,

$$\lambda_s=\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1}{3b_s} \tag{4-32}$$

齿顶漏磁导系数 λ_t

对于大型电机,

$$\lambda_t=\frac{t_a-b_s}{2\delta_K}+0.3 \tag{4-33}$$

对于中小型电机有换向极时,

$$\lambda t=0.15\frac{b_{pK}}{k_{\delta K}\delta_K} \tag{4-34}$$

在式(4-33)、(4-34)中, δ_K 为换向极气隙; $k_{\delta K}$ 为换向极气隙系数; t_a 为齿顶处齿距; b_{pK} 为换向极极靴宽度。而

$$k_{\delta K}=\frac{t_a}{t_a-\dfrac{b_s^2}{5\delta_K+b_s}} \tag{4-35}$$

式(4-35)适用于矩形槽。若为梨形槽,则应以 b_0 代替 b_s。

端部漏磁导系数 λ_E

$$\lambda_E=k\frac{l_E}{l_\delta} \tag{4-36}$$

式中 l_E——电枢绕组端部长度(厘米),即 $l_E=l_{aav}-l_\delta$;

k——系数,按表 4-2 选用。

电抗电动势是直流电机换向时引起火花的能源。为了改善换向,应使 e_r 减小,由式(4-26)可见,应尽可能降低 W_a, A、v_a、l_δ 和 ξ 诸量,即减少元件的匝数,在可能时最好选用 $W_a=1$ 的单匝绕组; 选用较大的 B_δ 使 A 降低; 在 $D_a^2l_\delta$ 不变的条件

表 4-2　不同绕组型式的 k 值(计算端部漏磁导系数时用)

绕组型式		叠、波绕组	蛙绕组
不同电枢绑扎材料的 k 值	磁性材料	0.75	0.5
	非磁性材料	0.5	0.375

下，应选用较大的 D_a 而缩短 l_δ，使($v_a l_\delta$)的乘积降低；以及采取可能的措施来降低 ξ 值。

由式(4-27)可见，ξ 和 $\frac{k_\beta}{2\beta_j}$、λ_s、λ_t、λ_E 诸量有关。采用浅而阔的槽形可以减少槽漏磁导 λ_s，从而可以降低 ξ。但是，λ_s、λ_t、λ_E 的变化范围通常不会很大，因而减小 ξ 主要是靠降低 $\frac{k_\beta}{2\beta_j}$。现在根据图 4-8 来分析 β_j、u、ε_K 对 $\frac{k_\beta}{2\beta_j}$ 大小的影响。

(1) 当 β_j 和 u 不变时，$|\varepsilon_K|$ 越大，k_β 越小，即 $\frac{k_\beta}{2\beta_j}$ 越小。从物理意义来看，$|\varepsilon_K|$ 增大能使上下层元件边进行换向的时刻错开得更长，从而使互感减小。因此，节距缩短数越大，改善换向的作用也越强。若节距缩短太多，会使换向区域宽度 b_K 增大，从而中性区域宽度也要相应增大，使极弧系数 α_p 不得不减小，降低了电机材料的利用率，所以 $|\varepsilon_K|$ 的增大是有限的，一般不大于 u。

(2) 当 β_j 和 ε_K 不变时，u 越小，k_β 越小，即 $\frac{k_\beta}{2\beta_j}$ 越小。从物理意义来看，u 减小能使槽内同层元件边间的互感减小。因此，在保持元件数和元件匝数不变的条件下，减少槽内每层并列的元件边数，就能改善换向。但是，这时增加了齿槽数。

(3) 当 u 和 ε_K 不变时，若把电刷宽度 b_b 选得略为大一些，使 β_j 增大，虽然 k_β 也会增大一些，但分析图 4-8 中的数

据后可知，$\frac{k_g}{2\beta_j}$ 是减小的。从物理意义来看，β_j 增大，使换向周期增大，换向电流的变化速度放慢，电抗电动势降低；这相当于换向周期不变，而换向元件的电感减小，即 ξ 的降低。因此，加大电刷宽度也能改善换向。或者，每组的各个电刷不是都排列在主磁极间的中心线上，而是沿换向器圆周方向离中心线略为左右偏移，其作用与加大电刷宽度等效，所以也能改善换向。但是，加大电刷宽度会使换向区域宽度增大，如前分析，这也有不利的一面，所以增加电刷宽度是有限度的。

电抗电动势 e_r 一般随电机功率的增大而增大，这是因为 A、v_a、l_δ 都随电机功率而增加。因此，在大、中型电机中设法降低 e_r 的问题就显得比较突出。

4-4 换向元件旋转电动势的计算

一、旋转电动势的计算

在没有换向极的情况下，换向元件所处的气隙磁场是由交轴电枢反应磁动势所产生的。假定气隙磁场沿电枢轴向的分布不变，根据 $e=Blv$ 的公式，可以推导出换向元件的一个元件边的旋转电动势是

$$e_{saq}=W_a v_a l_a B_{aq}\times 10^{-6}\quad (伏) \tag{4-37}$$

式中 W_a——电枢元件匝数；

l_a——电枢长度(厘米)；

B_{aq}——在主磁极之间由交轴电枢反应磁动势所产生的平均气隙磁通密度(高斯)。

其方向与电抗电动势的方向相同。

在装置换向极的情况下，换向元件所处的气隙磁场是由交轴电枢反应磁动势和换向极磁动势共同产生的。前已说明，

这两种磁动势的方向相反，而换向极磁动势较大，所以这个磁场的方向与单独由交轴电枢反应磁动势所产生的相反。在换向极底下的磁场，假定沿电枢轴向的分布不变，同样可以推导出换向元件的一个元件边的旋转电动势是

$$e_s = W_a v_a l_{pK} B_{\delta K} \times 10^{-6} \quad (\text{伏}) \qquad (4\text{-}38)$$

式中 l_{pK}——换向极的极靴长度(厘米)，在一般情况下，$l_{pK}=l_a$；

$B_{\delta K}$——换向极下的平均气隙磁通密度(高斯)。

其方向与电抗电动势的方向相反。

对于不装换向极的电机，换向元件的附加电动势 $\Sigma e = e_r + e_{saq} > 0$，换向必然是困难的。在这种情况下，有时将电刷移动位置，使电刷所短路的换向元件移入主磁极范围内，而该处的主磁极磁动势和交轴电枢反应磁动势方向相反，这就是说，对于电动机电刷逆转向移动，对于发电机电刷顺转向移动，以改善换向。

对于容量较小的二极电机，为了简化结构，减少零部件，常只装一个换向极。有时，四极电机也有只装两个换向极的。在这种情况下，换向元件的一个元件边的旋转电动势是 e_{saq}，另一个元件边的旋转电动势是 e_s，两者的方向相反。

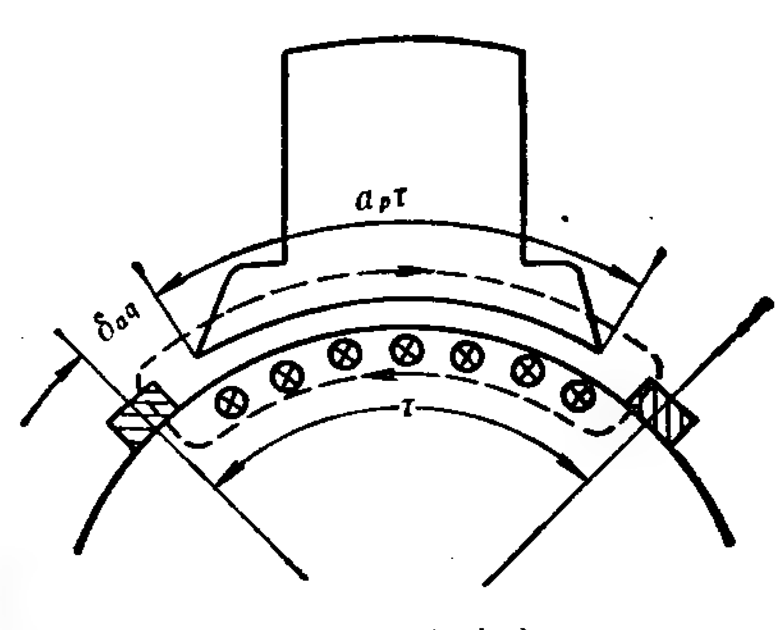


图 4-9　B_{aq} 的确定

二、无换向极时气隙磁通密度 B_{aq} 的计算

如图 4-9 所示，在虚线所表示的磁力线经过的闭合磁路内，如果假定铁磁物质的磁导率为无穷大，则铁心部

分所需的磁动势可不计，根据全电流定律，有

$$(0.8B_{aq})\times 2\delta_{aq}=A\tau$$

由于

$$\delta_{aq}=\frac{\tau-b_p}{2}=\frac{1-\alpha_p}{2}\tau$$

因此

$$B_{aq}=1.25\frac{A}{1-\alpha_p} \tag{4-39}$$

三、换向极气隙磁通密度 $B_{\delta K}$ 的计算

对于换向极极数等于主磁极极数一半的情况，换向极气隙的磁通密度 $B_{\delta K}$ 不但在方向上与 B_{aq} 相反，并且在数值上要求使由它所产生的旋转电动势 e_s 略大于电抗电动势 e_r 与由交轴电枢反应磁场所产生的旋转电动势 e_{saq} 之和，以期能得到轻微的超越换向，因为实践证明这是一种良好的换向。

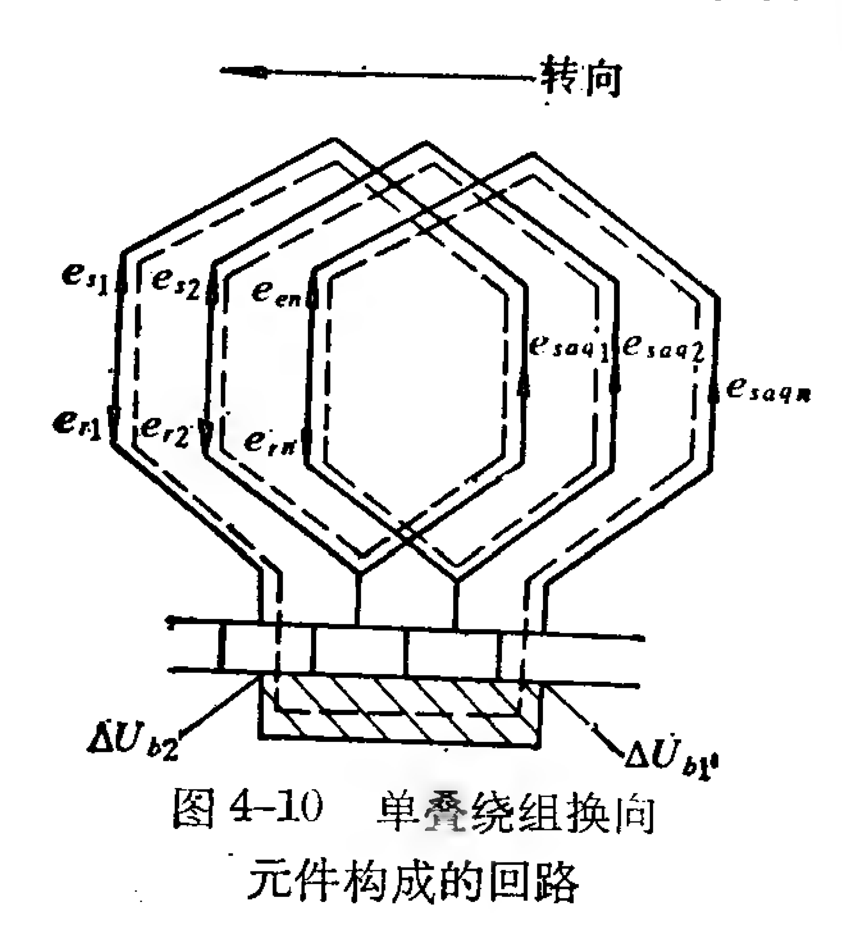


图 4-10　单叠绕组换向元件构成的回路

图 4-10 画出了单叠绕组的 n 个同时换向的元件，e_{r1}、e_{saq1}、e_{s1}，e_{r2}、e_{saq2}、e_{s2}，…，e_{rn}、e_{saqn}、e_{sn} 分别代表各个换向元件中的电抗电动势、电枢反应磁场的旋转电动势、换向极磁场的旋转电动势，其箭头方向均表示实际方向；ΔU_{b1} 为前刷边接触压降，ΔU_{b2} 为后刷边接触压降，ΔU_{b1} 和 ΔU_{b2} 的方向均由换向片指向电刷。图中虚线表示各元件串联起来的回路，其回路的电压方程为

$$(e_{s1}-e_{r1}-e_{saq1})+(e_{s2}-e_{r2}-e_{saq2})+\cdots+(e_{sn}-e_{rn}-e_{saqn})$$
$$=\Delta U_{b1}-\Delta U_{b2} \tag{4-40}$$

设 e_{r1}, e_{r2}, …, e_{rn} 的平均值为 e_r, e_{saq1}, e_{saq2}, …、e_{saqn} 的平均值为 e_{saq}, e_{s1}, e_{s2}, …、e_{sn} 的平均值为 e_s, 则式(4-40)可改写成

$$n(e_s-e_r-e_{saq})=\Delta U_{b1}-\Delta U_{b2} \tag{4-41}$$

对于单叠绕组，在虚线所示的回路中，元件数 n 等于电刷所覆盖的换向片数 β; 对于单波绕组，n 等于 β 乘上极对数 p。对于所有的各种型式的绕组，可以证明

$$n=\frac{p}{a}\beta \tag{4-42}$$

现在把 e_s、e_r 和 e_{saq} 的计算公式代入式(4-41)，得

$$\frac{p}{a}\beta[W_a v_a l_{pK} B_{\delta K}\times 10^{-6}-2W_a v_a A l_\delta \xi \times 10^{-6}-W_a v_a l_\delta B_{aq}\times 10^{-6}]=\Delta U_{b1}-\Delta U_{b2} \tag{4-43}$$

令 $\Delta U_b=\Delta U_{b1}-\Delta U_{b2}$, 代入上式，整理后可得

$$B_{\delta K}=2A\xi\frac{l_\delta}{l_{pK}}+B_{aq}\frac{l_\delta}{l_{pK}}+\frac{a\Delta U_b}{pW_a v_a l_{pK}\beta}\times 10^6 \quad (\text{高斯}) \tag{4-44}$$

如果 $l_\delta=l_{pK}$, 则上式为

$$B_{\delta K}=2A\xi+B_{aq}+\frac{a\Delta U_b}{pW_a v_a l_\delta\beta}\times 10^6 \quad (\text{高斯}) \tag{4-45}$$

上式表明，$B_{\delta K}$ 在换向元件中所感应的电动势有三个分量: 第一项用以抵消电抗电动势，第二项用以抵消在没有换向极的部分由交轴电枢反应磁场所引起的旋转电动势，第三项用来得到一定程度的超越换向的电动势。

$\Delta U_b=\Delta U_{b1}-\Delta U_{b2}$ 是前刷边与后刷边接触压降之差，其值必须大于零，才能得到超越换向。使用石墨电刷时，取 $\Delta U_b=0.75$ 伏，使用含铜石墨电刷时，取 $\Delta U_b=0.25$ 伏。

对于换向极极数等于主磁极极数的电机，换向极气隙的磁通密度在数值上要求使由它所产生的旋转电动势略大于电

抗电动势。如仍设 e_s 为换向元件的一个元件边的旋转电动势，于是有

$$n(2e_s - e_r) = \Delta U_b$$

即
$$\frac{p}{a}\beta[2W_a v_a l_{pK} B_{\delta K} \times 10^{-6} - 2W_a v_a (l_\delta - l_{pK}) B_{aq} \times 10^{-6} - 2W_a v_a A l_\delta \xi \times 10^{-6}] = \Delta U_b$$

整理后得

$$B_{\delta K} = A\xi \frac{l_\delta}{l_{pK}} + B_{aq}\frac{l_\delta - l_{pK}}{l_{pK}} + \frac{a\Delta U_b}{2pW_a v_a l_{pK}\beta} \times 10^6 \text{（高斯）} \tag{4-46}$$

如果 $l_\delta = l_{pK}$，则上式为

$$B_{\delta K} = A\xi + \frac{a\Delta U_b}{2pW_a v_a l_\delta \beta} \times 10^6 \text{（高斯）} \tag{4-47}$$

最后，还必须指出：装置换向极能在换向周期内使 e_s 与 e_r 的平均值相抵消，而不能使它们在换向周期内任一瞬间都相互抵消，因为 e_s 和 e_r 的瞬时值随时间而变化的规律是各不相同的，前者决定于 $B_{\delta K}$ 在换向区域内的空间分布，而后者是与换向元件中电流的变化规律及绕组元件的安排有关。e_s 与 e_r 的瞬时值之差见图 4-11。因此，为了改善换向，还应使这两个电动势的瞬时差值较小，以获得较好的瞬时补偿度。

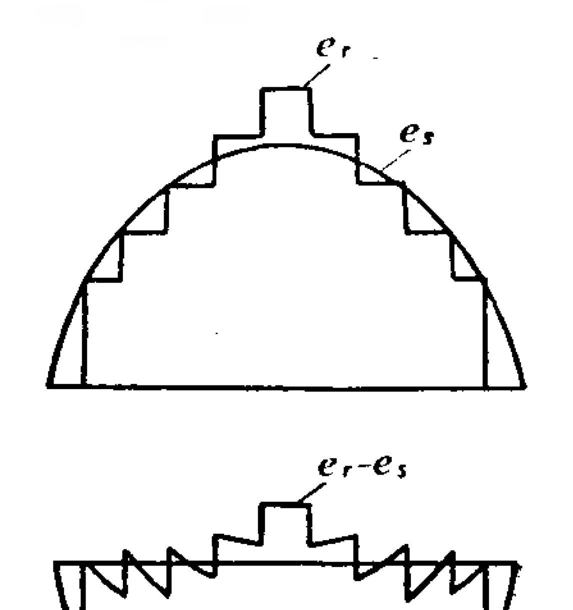


图 4-11　e_r 与 e_s 的瞬时值

4-5　换向区域宽度与换向极

一、换向区域宽度

在直流电机的一个电枢槽内，同层的各元件边并不是同

时进行换向，而是依次相隔一个换向器片距 t_K 进行换向的。如图 4-12 所示的 $u=3$ 的单叠绕组，元件 1 最先开始换向，元件 2 其次，元件 3 最后，其间隔为换向器转过一个换向器片距。

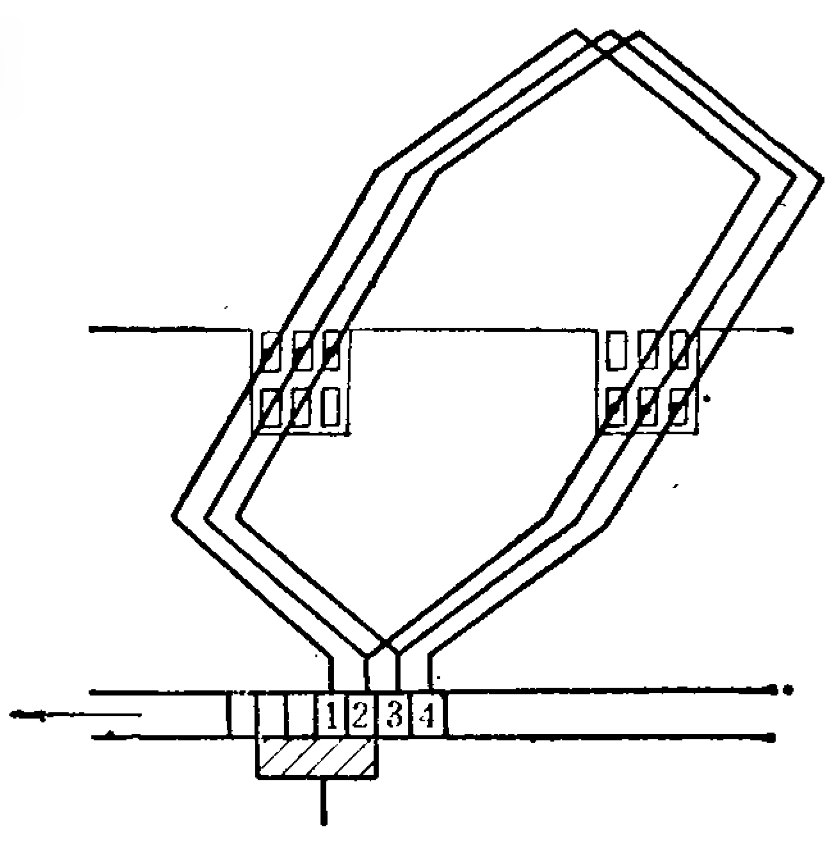


图 4-12　槽内同层元件边换向的次序

槽内对应的上下层元件边也不一定是同时进行换向的。对于整距绕组而言，从图 4-13a) 可以看出，元件 A 和元件 B 与电刷的相对位置相同，在槽 1 中 B 的上层边和 A 的下层边是同时开始换向、同时结束换向的。但是，对短距绕组而言，从图 4-13b) 可

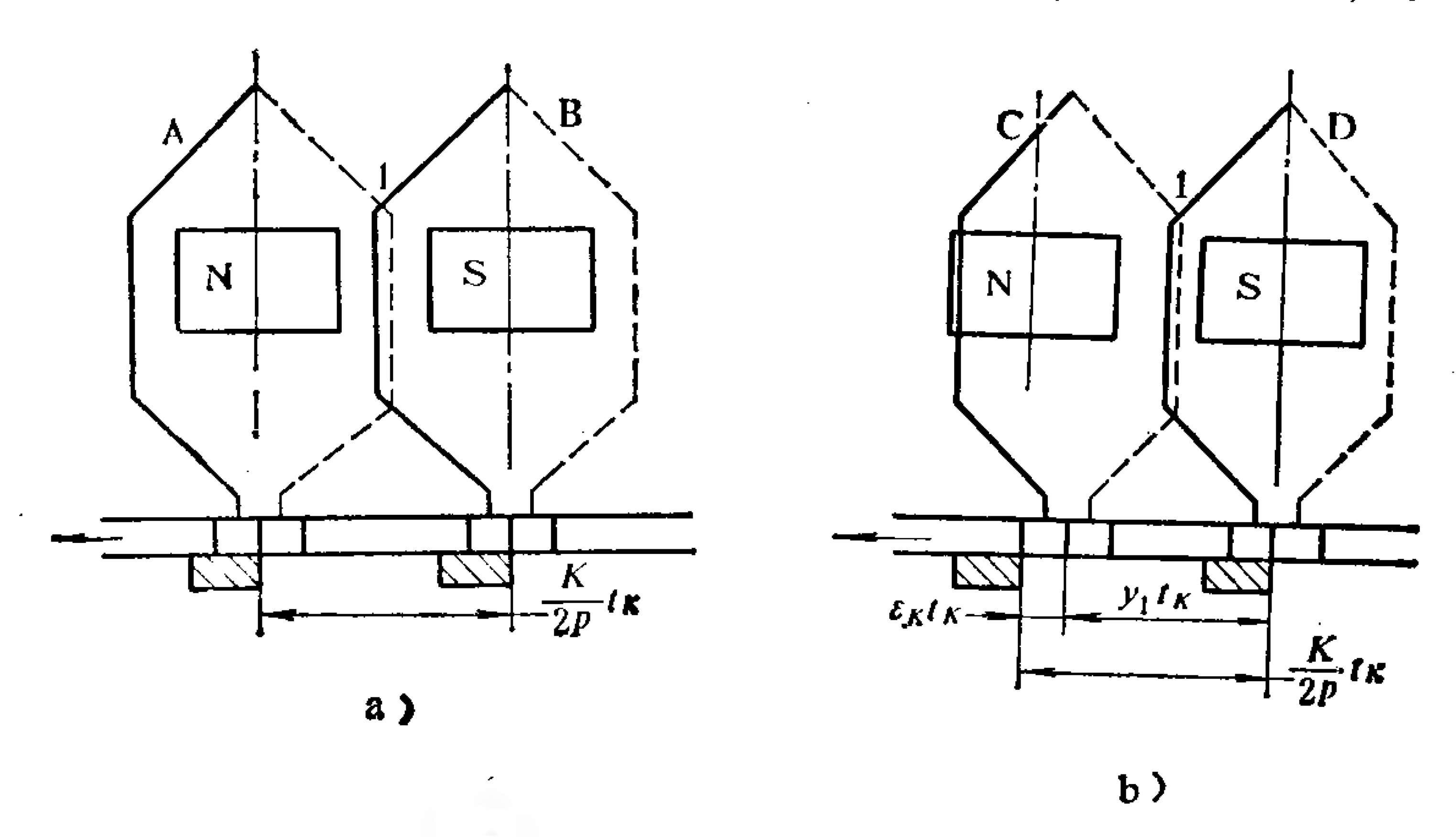


图 4-13　槽内对应的上下层元件边换向的次序

a) 整距绕组　b) 短距绕组

以看出，元件C和元件D对电刷的相对位置是不同的，在槽1中D的上层边先开始换向，经过换向器转过 $\varepsilon_K t_K$ 距离后，C的下层边才开始换向。

因此，从槽内第一个元件边换向开始，到末一个元件边换向结束止，有一个时间过程。对应于这个槽内各元件边进行换向的时间过程，电枢槽在电枢表面的空间转过了一个距离，这个距离称为换向区域宽度，用 b_K 表示。这也就是说，在这个换向区域内，槽内始终有元件在换向，而在这个换向区域外，槽内没有元件在换向。从图4–14可见，对单叠绕组而言，槽内从第一个元件换向开始到最后一个元件换向结束止，换向器相对于电刷转过的弧长距离是

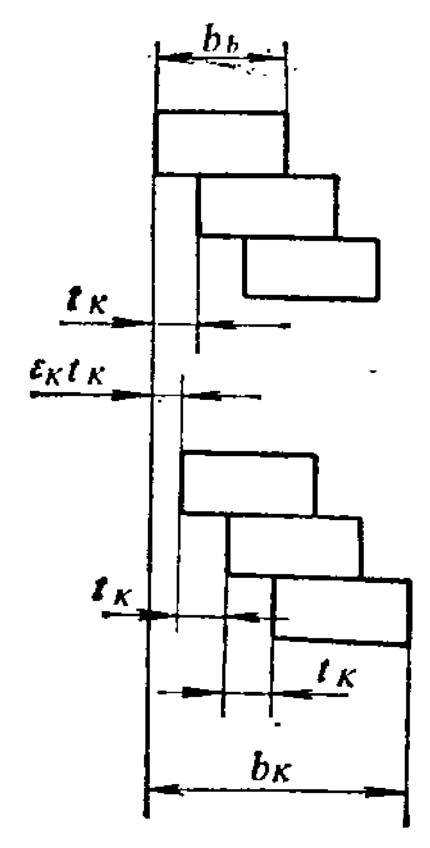


图4–14　单叠绕组的换向区域

$$b_{bK}=b_b+(u-1)t_K+|\varepsilon_K|t_K \quad (\text{厘米})$$

把它转换到电枢表面，则其换向区域宽度是

$$b_K=\frac{D_a}{D_K}[b_b+(u-1)t_K+|\varepsilon_K|t_K] \quad (\text{厘米})$$

对于一般情况，即对所有的叠绕组和波绕组而言，在一个元件换向开始到结束止，换向器相对于电刷所转过的弧长，根据图4–7，得

$$b_b'=b_b+\left(1-\frac{a}{p}\right)t_K \quad (\text{厘米})$$

由于槽内还有 $u-1$ 个元件要依次换向，除了重叠的部分外，换向器还要相应地转过 $(u-1)t_K$ 的距离。此外，考虑到 $|\varepsilon_K|\neq 0$ 时，上下层元件边不同时进行换向，换向器再要转过

$\varepsilon_K t_K$ 的距离。因此，这时以换向器表面距离计的换向区域为

$$b_{bK}=b_b+\left(1-\frac{a}{p}\right)t_K+(u-1)t_K+|\varepsilon_K|t_K$$

$$=b_b+\left(u-\frac{a}{p}\right)t_K+|\varepsilon_K|t_K \quad (\text{厘米}) \qquad (4\text{–}48)$$

把它转换到电枢表面，则一般情况下的换向区域宽度为

$$b_K=\frac{D_a}{D_K}\left[b_b+\left(u-\frac{a}{p}\right)t_K+|\varepsilon_K|t_K\right] \quad (\text{厘米}) \qquad (4\text{–}49)$$

对于装置换向极的电机，在换向区域宽度内不希望有主磁极磁通进入，以免在换向元件中产生其他电动势而受到干扰，因此换向区域宽度要比中性区域宽度小一些，而中性区域宽度是

$$b_n=\tau-b_p \quad (\text{厘米}) \qquad (4\text{–}50)$$

换向区域宽度与中性区域宽度之比应不超过 0.60～0.75，即

$$\frac{b_K}{b_n}\leqslant(0.60\sim0.75) \qquad (4\text{–}51)$$

按照生产实践经验，小型电机可取高值(采用偏心气隙时还可以略高)，中、大型电机应取低值。但是，此比值也不宜太低，否则因主磁极极弧长度的减小而降低了电机材料的利用率。

二、换向极

1. 换向极尺寸

换向极的形状如图 4–15 所示。

(1) 换向极极靴长度 l_{pK}

$$l_{pK}=l_a \quad (\text{厘米}) \qquad (4\text{–}52)$$

(2) 换向极极靴宽度 b_{pK}

对于中小型电机

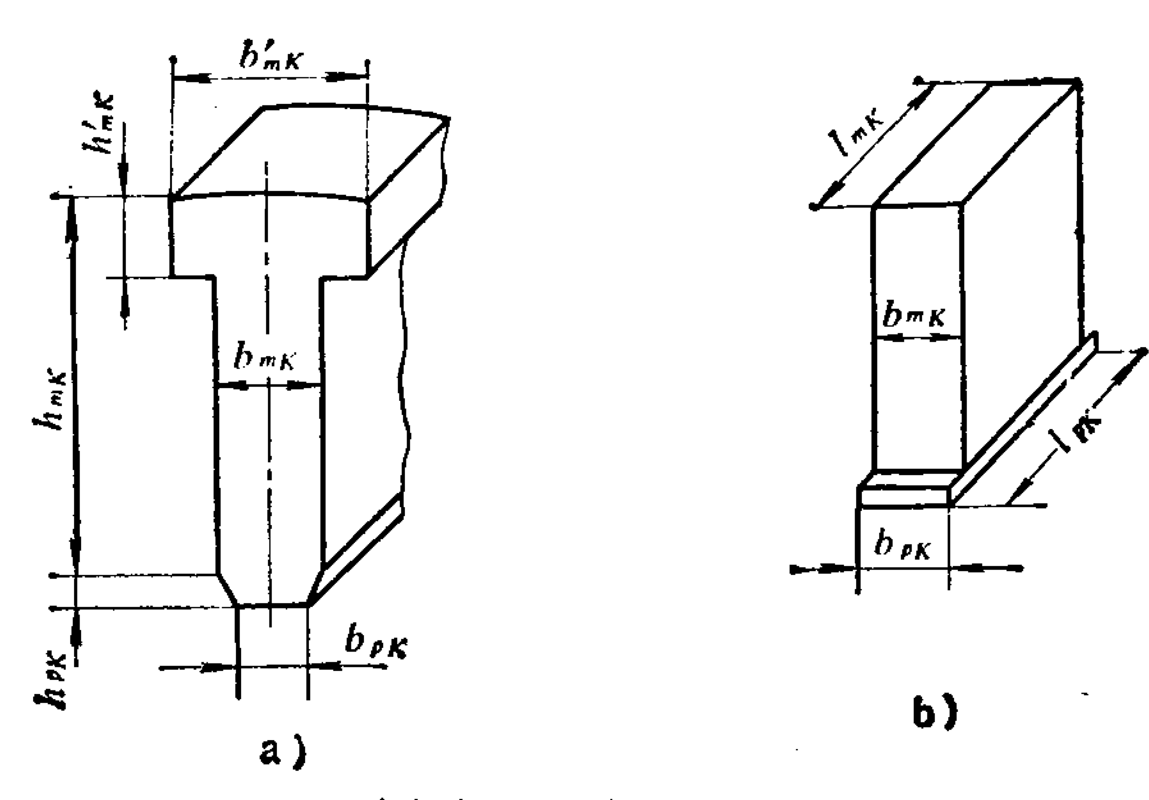


图 4-15　换向极形状

a）中、大型电机　b）中、小型电机

$$b_{pK}=(0.6\sim0.8)b_K \quad (\text{厘米}) \tag{4-53}$$

对于大型电机

$$b_{pK}=(0.4\sim0.65)b_K \quad (\text{厘米}) \tag{4-54}$$

或

$$b_{pK}=b_K-(2\sim3)\delta_K \quad (\text{厘米}) \tag{4-55}$$

$b_{pK}<b_K$ 是由于考虑到存在磁场的边缘效应，较小的极靴宽度已能使换向极磁场基本上覆盖换向区域。换向极极靴宽度不宜太宽，因太宽将导致它和主磁极极靴之间的距离缩短，从而增加换向极的漏磁。换向极的漏磁路径如图 4-16 中虚线 2 所示。漏磁的增加会使换向极极身的磁通密度提高，从而使换向极饱和，对换向不利。

(3) 换向极极身长度 l_{mK} 和宽度 b_{mK}

如图 4-15b)所示，中小型电机的换向极极身长度 l_{mK} 常比极靴长度 l_{pK} 小 1.5～3 厘米，形成一个台阶，把换向极绕组托住，台阶的厚度约为 0.5～0.8 厘米。换向极极身宽度 b_{mK} 一般和极靴宽度 b_{pK} 相等。

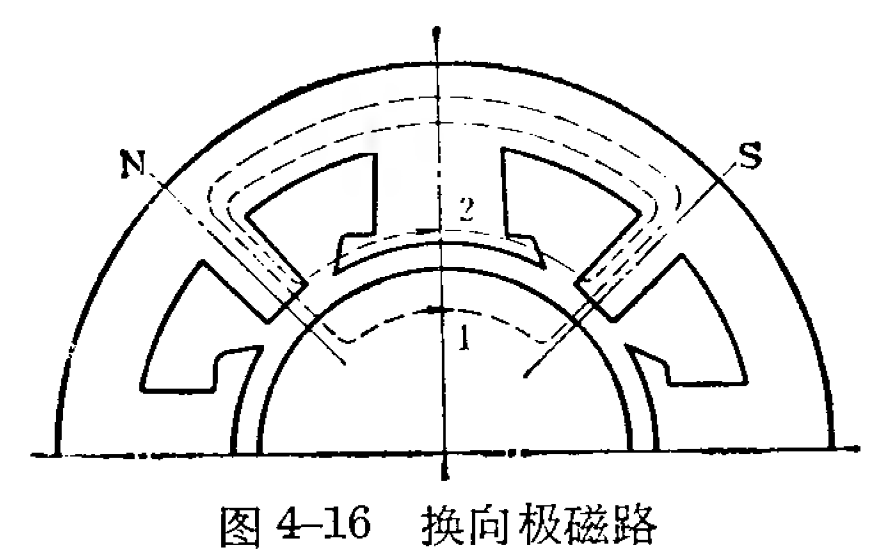


图 4-16　换向极磁路

1—换向极气隙磁通　2—换向极漏磁通

如图 4-15a) 所示，中大型电机的换向极极身长度 l_{mK} 一般和极靴长度 l_{pK} 相同。换向极极身宽度 b_{mK} 比极靴宽度 b_{pK} 大，其大小要根据过载情况下的换向极极身磁通密度 $B_{mK\max}$ 确定，见式(4-61)，一般使 $B_{mK\max}$ 不大于 14000 高斯，以免磁路饱和。

2．换向极气隙

换向极气隙长度的选择范围如下：

对于中小型电机，

$$\delta_K=(1.5\sim2.2)\delta \tag{4-56}$$

对于大型电机，

$$\delta_K=(3\sim4)\delta \tag{4-57}$$

换向极气隙 δ_K 比主磁极气隙 δ 大，这是为了使电枢电流(亦即换向极磁路的磁动势)与换向极气隙磁密 $B_{\delta K}$ 间能接近线性关系，使由 $B_{\delta K}$ 产生的旋转电动势在不同的负载电流下都能与电抗电动势基本上相抵消，以利于换向。同时，增大换向极气隙后，能减小换向极气隙磁通密度受电枢齿槽影响而产生的脉动。

中大型电机，以及有些由可控硅整流电源供电的小型直流电动机，在换向极与机座之间还有第二气隙，这个气隙是用

非磁性填片垫在其间而形成，其作用是减少换向极漏磁和调整换向极的气隙磁通。

3．换向极磁通

额定负载时的换向极气隙磁通

$$\Phi_K = B_{\delta K} l_{pK} b_K \tag{4-58}$$

换向极极身磁通为换向极的气隙磁通与漏磁通之和

$$\Phi_{mK} = \Phi_K + \Phi_{\sigma K} = \left(1 + \frac{\Phi_{\sigma K}}{\Phi_K}\right) \Phi_K = \sigma_K \Phi_K \tag{4-59}$$

式中 σ_K——换向极漏磁系数。

对于无补偿电机，

$$\sigma_K = 3.0 \sim 5.0$$

对于有补偿电机，

$$\sigma_K = 2.0 \sim 3.0$$

换向极极身磁通密度

$$B_{mK} = \frac{\Phi_{mK}}{k_{\mathrm{Fe}\,m} b_{mK} l_{mK}} \tag{4-60}$$

式中 $k_{\mathrm{Fe}\,m}$——叠片铁心磁极的压装系数，在整块铁心时，$k_{\mathrm{Fe}\,m} = 1$。

过载时换向极极身磁通密度

$$B_{mK\max} = B_{mK} \frac{I_{\max}}{I_N} \tag{4-61}$$

4-6 补偿绕组

电机在负载运行时，由于电枢反应的影响，气隙磁密分布曲线将发生畸变，如图 4-17 所示。由于电枢元件感应的电动势正比于气隙磁通密度，而元件的电动势又接近于换向器的片间电压，故图中的磁通密度曲线又可以看作是片间电压分布曲线。当负载很大时，磁密曲线畸变得很厉害，在电动机的

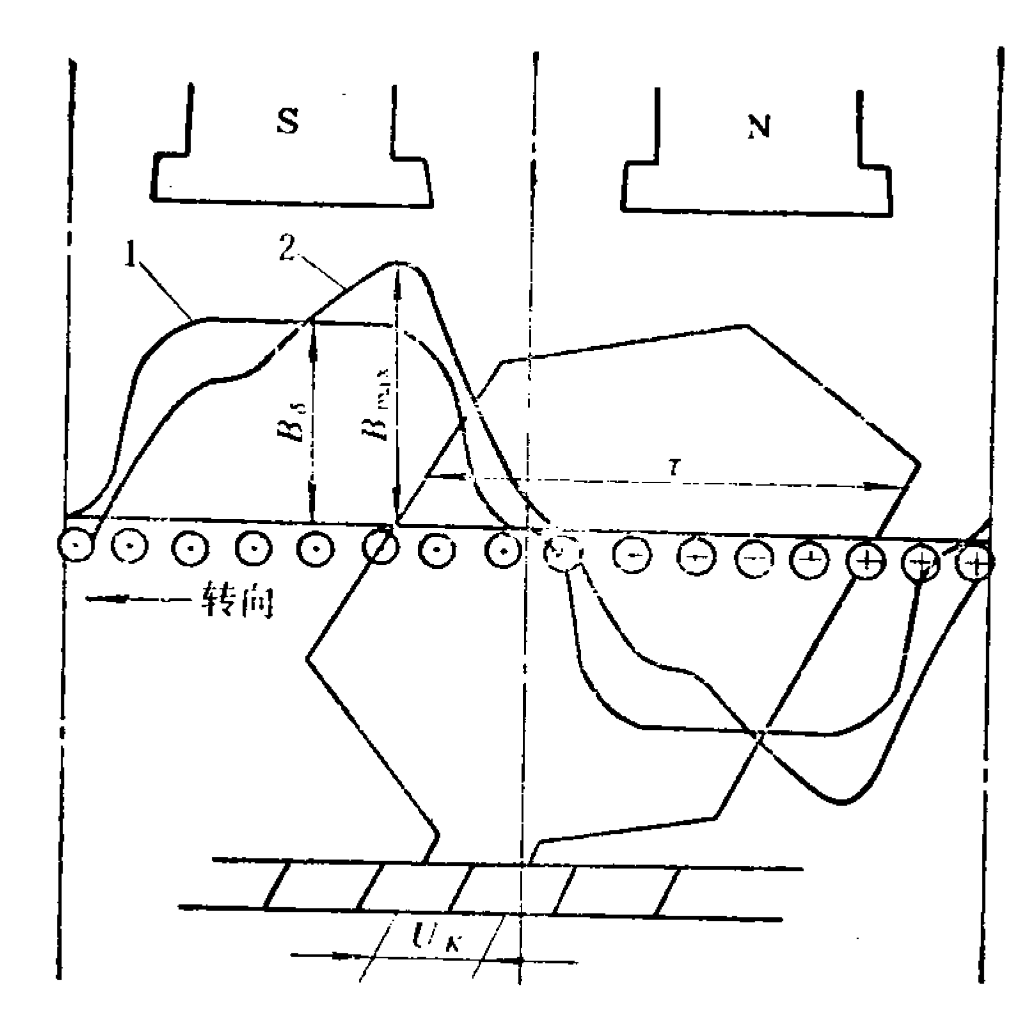


图 4-17 气隙磁密分布曲线的畸变及其影响换向片间电压的示意(电动机状态)

1—空载时的磁密曲线 2—负载时的磁密曲线

前极尖(或发电机的后极尖)处气隙磁密将达到很大数值，因此该处的片间电压也将达到很大的数值。过高的片间电压会使片间的空气隙击穿而产生电位差火花。

当电机受到冲击性负载时，由于电枢电流急剧上升，电抗电动势达到很大数值。这时虽然换向极磁动势相应增大，但由于换向极磁路铁心中产生涡流，引起阻尼作用，换向极磁场不能立即增大，因此旋转电动势 e_s 不能及时抵消 e_r，这时 $\Sigma e>0$，电机处于十分严重的延迟换向状态，从而在电刷的后刷边产生了剧烈的电弧。如果电弧与电位差火花汇合在一起，就可能形成环火，将使换向器、电刷和电枢绕组受到严重的损害。

为了防止电位差火花和环火的发生，最有效的办法是采

用补偿绕组。补偿绕组嵌在主磁极极靴表面的槽中，补偿绕组导体中的电流与电枢绕组导体中的电流反向，因此补偿绕组所产生的磁动势的方向和电枢绕组的相反。为了在任何负载下都能抵消电枢反应磁动势，补偿绕组与电枢绕组串联。这样，就使任何负载时的气隙磁场接近于空载时的情况，消除了磁场畸变。

补偿绕组常装在中、大型直流电机、高速、广调速的直流电动机以及过载倍数大、负载变化剧烈的直流电机中。

为了将主磁极极弧范围内的电枢绕组磁动势全部补偿，补偿绕组每对极的磁动势为

$$F_c = b_p A \quad (\text{安/极对}) \tag{4-62}$$

式中 b_p——主磁极极弧长度(厘米)；

A——电枢绕组的电负荷(安/厘米)。

于是补偿绕组在完全补偿时每极导体数的计算值为

$$N'_{pc} = \frac{b_p A}{\frac{I_a}{a_c}} = \frac{a_c b_p A}{I_a} \tag{4-63}$$

其中，a_c 是补偿绕组的并联支路数。a_c 的选择应使补偿绕组的导体具有合适的尺寸，并使 a_c 为极数的约数，以便于制造。

每槽有效导体数的初步值为

$$n'_{pc} = \frac{N'_{pc}}{Z_{pc}} \tag{4-64}$$

其中，Z_{pc} 是补偿绕组的每极槽数。补偿绕组的槽一般是均匀分布于极靴上，为了避免电机运行时发生的电磁振动和噪音，补偿槽的齿距与电枢槽的齿距至少应有 10% 的差值。从这点出发，再参考可能选取的每槽导体数，就可以确定补偿槽数。

实际选取的每槽导体数 n_{pc} 为接近于 n'_{pc} 的整数。确定

了 n_{pc} 后，就可以得到每极导体数

$$N_{pc}=Z_{pc}n_{pc} \tag{4-65}$$

再根据补偿绕组的电流密度(约在 4～5 安/毫米²)和补偿槽的绝缘规范，就可以确定补偿槽的槽形。

由于实际选取的每极导体数 N_{pc} 和要求完全补偿所需每极导体数的计算值不会相同，所以实际的补偿程度只能接近于完全补偿。补偿绕组的补偿度为

$$\chi_p=\frac{N_{pc}}{N'_{pc}}\times 100\% \tag{4-66}$$

在设计时，χ_p 一般控制在 80～105% 的范围内。

4-7 换向极绕组

一、线圈计算

图 4-18 表示换向极磁路。在换向极绕组通入电枢电流时，所产生的换向极磁动势除了克服交轴电枢反应磁动势以外，还要产生平均气隙磁通密度为 $B_{\delta K}$ 的换向极磁场。当然，如果有补偿绕组的话，在换向极的磁动势中应扣除补偿绕组的磁动势。

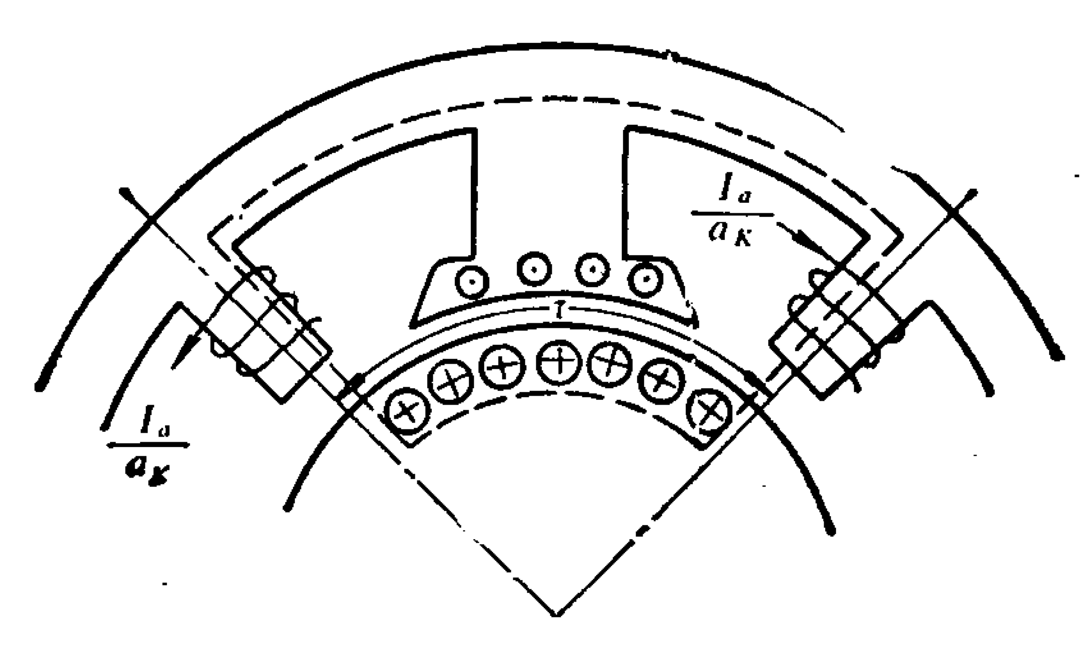


图 4-18 换向极磁路

1. 产生换向极气隙磁通所需的匝数 W_1

在换向极磁路中，气隙部分的磁动势可按 $(0.8B_{\delta K})k_{\delta K}\delta_K$ 进行计算，铁磁材料部分所需的磁动势一般加以估计，大约取为气隙磁动势的十分之一，所以气隙和铁所需磁动势之和为 $1.1\times 0.8B_{\delta K}k_{\delta K}\delta_K$/极。每个换向极的相应匝数为

$$W_1=\frac{1.1\times 0.8B_{\delta K}k_{\delta K}\delta_K a_K}{I_a} \tag{4-67}$$

式中 $k_{\delta K}$——换向极的气隙系数，见式(4-35)；

a_K——换向极绕组并联支路数。

2. 抵消交轴电枢反应所需的匝数 W_q

交轴电枢反应的磁动势为 $\frac{1}{2}A\tau$/极。所以每个换向极的相应匝数

$$W_q=\frac{A\tau a_K}{2I_a} \tag{4-68}$$

如果考虑到在电刷下被短路的换向元件电流较小，可等效地将短路元件的匝数减去一半，再考虑到绕组短节距的影响，则每极磁动势 $\frac{1}{2}A\tau$ 应改为

$$\frac{1}{2}(N_a-2pW_a\beta)\frac{I_a}{2a}\frac{1}{\pi D_a}\frac{y_1}{\frac{K}{2p}}\tau$$

$$=(N_a-2pW_a\beta)\frac{\frac{K}{2p}-|\varepsilon_K|}{4aK}I_a$$

从而每极的相应匝数要改为

$$W_q=(N_a-2pW_a\beta)\frac{\frac{K}{2p}-|\varepsilon_K|}{4a_K}a_K \tag{4-69}$$

3. 换向极绕组每极匝数 W_K

$$W_K = W_1 + W_q - W_c + W_2 \tag{4-70}$$

式中　W_c——折合到换向极绕组电流的补偿绕组匝数；

W_2——第二气隙所需匝数，应使 W_K 凑成整匝或半匝。

因为补偿绕组的并联支路数 a_c 与换向极绕组的并联支路数 a_K 可能是不同的，所以补偿绕组的实际匝数不能直接应用到计算换向极绕组匝数。补偿绕组的磁动势为 $\frac{1}{2}\frac{I_a}{a_c}N_{pc}$ 安/极，折算到换向极绕组，应有

$$\frac{I_a}{a_K}W_c = \frac{1}{2}\frac{I_a}{a_c}N_{pc}$$

所以

$$W_c = \frac{1}{2}\frac{a_K}{a_c}N_{pc} \tag{4-71}$$

4．换向极第二气隙

$$\delta_{K2} = \frac{I_a W_2}{0.8 B_{\delta K}\sigma_K a_K}\frac{b'_{mK}}{b_K}\ \text{（厘米）} \tag{4-72}$$

二、线圈尺寸的确定

导线截面

$$A_{\text{Cu}\,K} = \frac{I_a}{a_K J_K}\ \text{（毫米}^2\text{）} \tag{4-73}$$

式中　J_K——换向极绕组电流密度，对于铜导线，$J_K=4\sim5.5$ 安/毫米²；对于铝导线，J_K 可取铜导线的 60% 左右。

线圈型式常用的有两种：即用裸铜排扁绕和用绝缘圆线或扁线叠绕。前者用于容量较大、电流较大的电机，后者用于容量较小、电流较小的电机。

用裸铜排扁绕的线圈如图 4-19 所示。线圈内部不用框架，换向极极身倒角 5 毫米 ×45°。

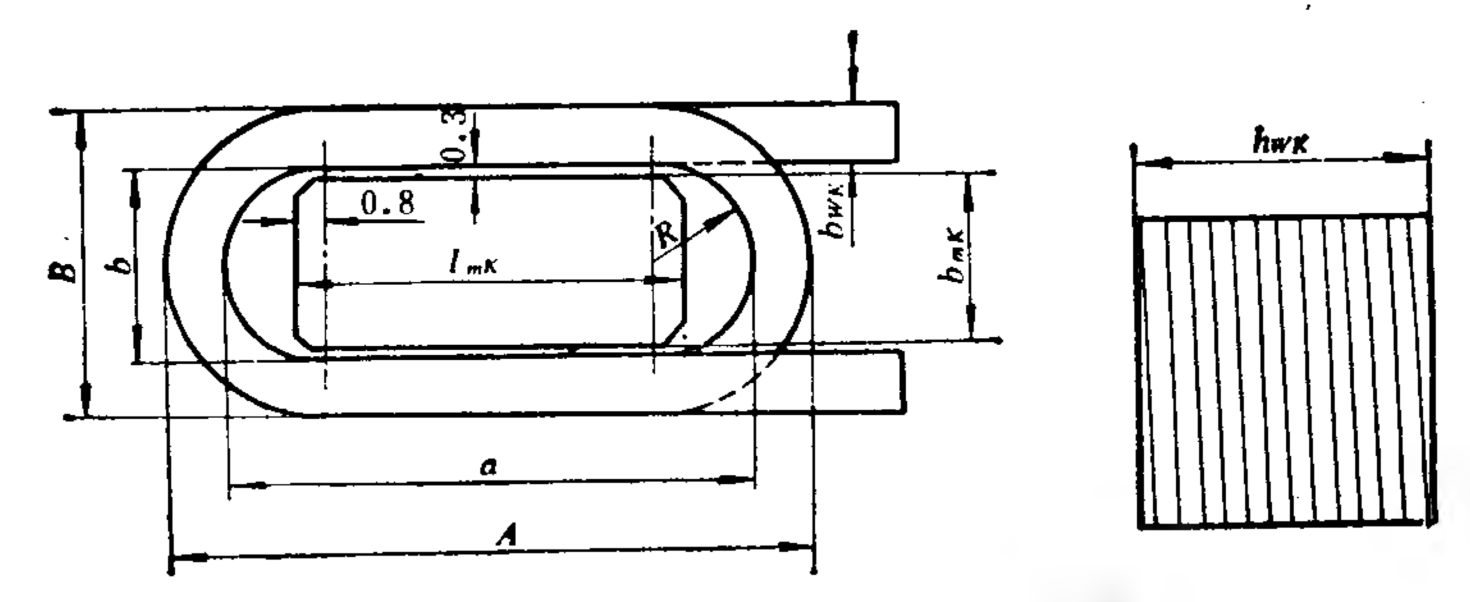


图 4-19 用裸铜排扁绕的换向极线圈

内框尺寸：

$$b=b_{mK}+2\times0.3 \quad (厘米)$$

$$a=l_{mK}-2\times0.8+b \quad (厘米)$$

外框尺寸：

$$B=b+2b_{WK} \quad (厘米)$$

$$A=a+2b_{WK} \quad (厘米)$$

式中 b_{WK}——铜排宽度(厘米)。

换向极绕组高度

$$h_{WK}=[导线高\times每极匝数+(匝数-1)\times0.04]+0.32 \quad (厘米)$$

式中 0.04——匝间绝缘厚度(厘米)；

0.32——两面的端匝绝缘加上高度方向所给裕量，$0.32=0.06\times2+0.2$。

平均匝长

$$l_{Kav}=2(l_{mK}-1.6)+\pi(b+b_{WK}) \quad (厘米) \qquad (4-74)$$

用绝缘圆线或扁线叠绕的线圈如图 4-20 所示。线圈内部用框架，框架圆角半径为 R，通常取 0.5 厘米。换向极极身一般不倒角。

内框尺寸：

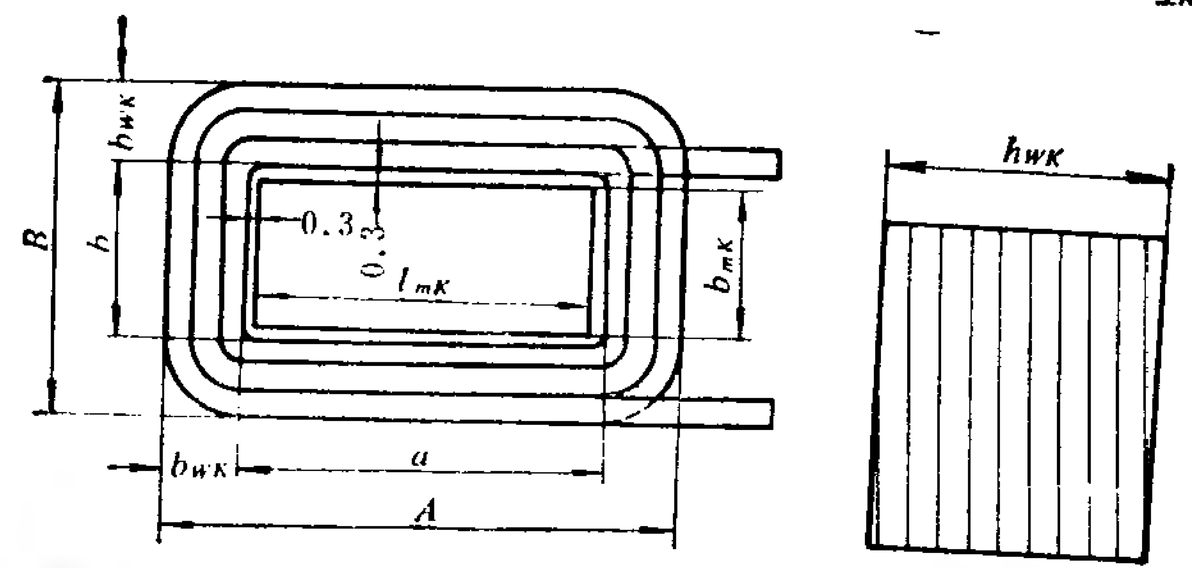


图 4-20 用绝缘圆线或扁线叠绕的换向极线圈

$$b=b_{mK}+2\times0.3 \quad (\text{厘米})$$
$$a=l_{mK}+2\times0.3 \quad (\text{厘米})$$

外框尺寸：

$$B=b+2b_{WK} \quad (\text{厘米})$$
$$A=a+2b_{WK} \quad (\text{厘米})$$

式中 b_{WK}——{ 绝缘导线直径×每极层数×α+0.025(圆线)；绝缘导线宽×每极层数×α+0.025(扁线)；

α——绕制松散系数，一般取值范围为1～1.08；

0.025——线圈外包绝缘厚度。

绕组高度

$$h_{WK}=(\text{绝缘导线高}\times\text{每层匝数}\times\alpha)+0.05+0.17 \quad (\text{厘米})$$

式中 0.05——外包绝缘一层厚度；

0.17——引出线绝缘及引出片厚度，$0.17=0.05\times2+0.07$。

平均匝长

$$l_{Kav}=2[(a-2R)+(b-2R)]+2\pi\left(R+\frac{b_{WK}}{2}\right)$$
$$=2(a+b)+\pi b_{WK}-1.72R \quad (\text{厘米}) \qquad (4\text{-}75)$$

三、换向极绕组总长、重量和电阻的计算

换向极绕组总长：

$$L_K = l_{Kav} W_K \times 2p_K \tag{4-76}$$

式中 p_K——换向极极对数。

换向极绕组重量(不包括绝缘)：

用铜线绕制时，

$$G_{Cu\,K} = L_K A_{Cu\,K} \times 8.9 \times 10^{-5} \quad (公斤) \tag{4-77}$$

用铝线绕制时，

$$G_{Al\,K} = L_K A_{Al\,K} \times 2.7 \times 10^{-5} \quad (公斤) \tag{4-78}$$

换向极绕组 75°C 时电阻：

用铜线绕制时，

$$R_{K\,75^\circ C(Cu)} = \frac{L_K}{A_{Cu\,K} a_K^2} \times 2.17 \times 10^{-4} \quad (欧) \tag{4-79}$$

用铝线绕制时，

$$R_{K\,75^\circ C(Al)} = \frac{L_K}{A_{Al\,K} a_K^2} \times 3.46 \times 10^{-4} \quad (欧) \tag{4-80}$$

换向极绕组 115°C 时电阻：

$$R_{K\,115^\circ C(Cu)} = 1.129 R_{K\,75^\circ C(Cu)} \quad (欧) \tag{4-81}$$

$$R_{K\,115^\circ C(Al)} = 1.132 R_{K\,75^\circ C(Al)} \quad (欧) \tag{4-82}$$

第五章　磁　　路

5-1 概　　述

直流电机的磁路是指主磁通从一个主磁极经气隙进入电枢齿，通过电枢轭到邻近极下的电枢齿，再经过气隙到邻近的不同极性的主磁极，然后通过机座轭所组成的磁通闭合路径，如图 5-1 的虚线 1、2 所示。

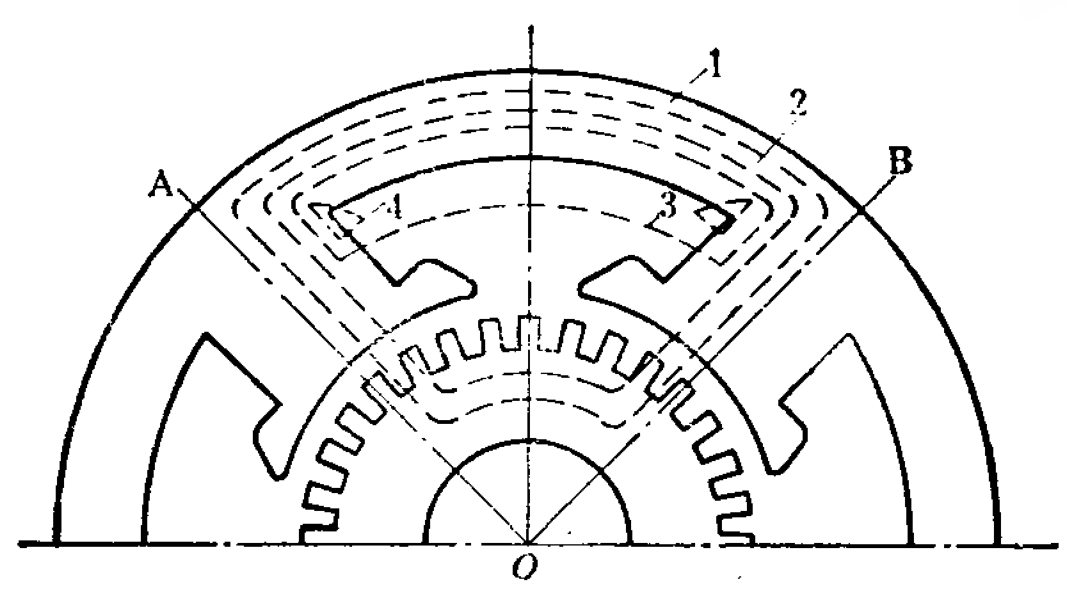


图 5-1　四极直流电机磁路剖面

1、2—剖面图　3、4—漏磁通

电机磁路计算的目的是确定磁路各部分的尺寸，计算额定电压下空载和额定负载时所需的励磁磁动势，并设计主磁极的励磁绕组。

磁路计算的基础是全电流定律。磁路计算所采用的方法是分段计算法。若把整个磁路分成 n 段，则总磁动势就是各段磁动势的代数和，即

$$\sum F=\sum_{x=1}^{n} H_xL_x \tag{5-1}$$

式中　H_x——第 x 段的磁场强度(安/厘米);

L_x——第 x 段的磁路长度(厘米);

H_xL_x——第 x 段的磁动势(安);

$\sum F$——总磁动势(安)。

根据上述方法,直流电机的磁路可分成五段:(1)气隙(包括两个);(2)电枢齿(包括两个);(3)电枢轭;(4)磁极(包括两个,若有补偿绕组,则磁极上的齿磁动势需分开来计算,如同电枢齿一样处理);(5)机座轭。这五段磁动势之和就是直流电机一对极的励磁磁动势。由于磁路的对称性,也可以计算半条磁路的磁动势,即一段气隙、一段电枢齿、半段电枢轭、一段磁极和半段机座轭的磁动势之和,这就是每级的励磁磁动势。在电机设计中,习惯上计算每极的励磁磁动势。

关于每一段磁路磁动势的具体计算方法,将在以后各节中叙述。磁路计算的步骤如下:由额定电动势 E_N 求出主磁通 Φ_N,从 Φ_N 决定每段磁路的磁通 Φ_x。再按电机的几何尺寸求出磁路各分段的截面积 S_x,根据 Φ_x 和 S_x 决定每段的磁通密度 $B_x(B_x=\Phi_x/S_x)$。按 B_x 的数值由材料的磁化曲线求出相应的磁场强度 H_x,根据半条磁路内各段的磁路长度 L_x,可算出各段的磁动势 H_xL_x,最后把它们相加,即得到每极的总磁动势 $\sum H_xL_x$。综上所述,磁路计算的步骤可用下面的关系表示:

$$E_N\rightarrow\Phi_N\rightarrow\Phi_x\rightarrow B_x\rightarrow H_x\rightarrow H_xL_x\rightarrow\sum H_xL_x$$

5-2　气隙选择及其磁动势

一、气隙选择

电机的气隙是指主磁极极靴的弧形表面与电枢外圆表面之间的间隙。直流电机的气隙有均匀气隙、极尖削角的均匀

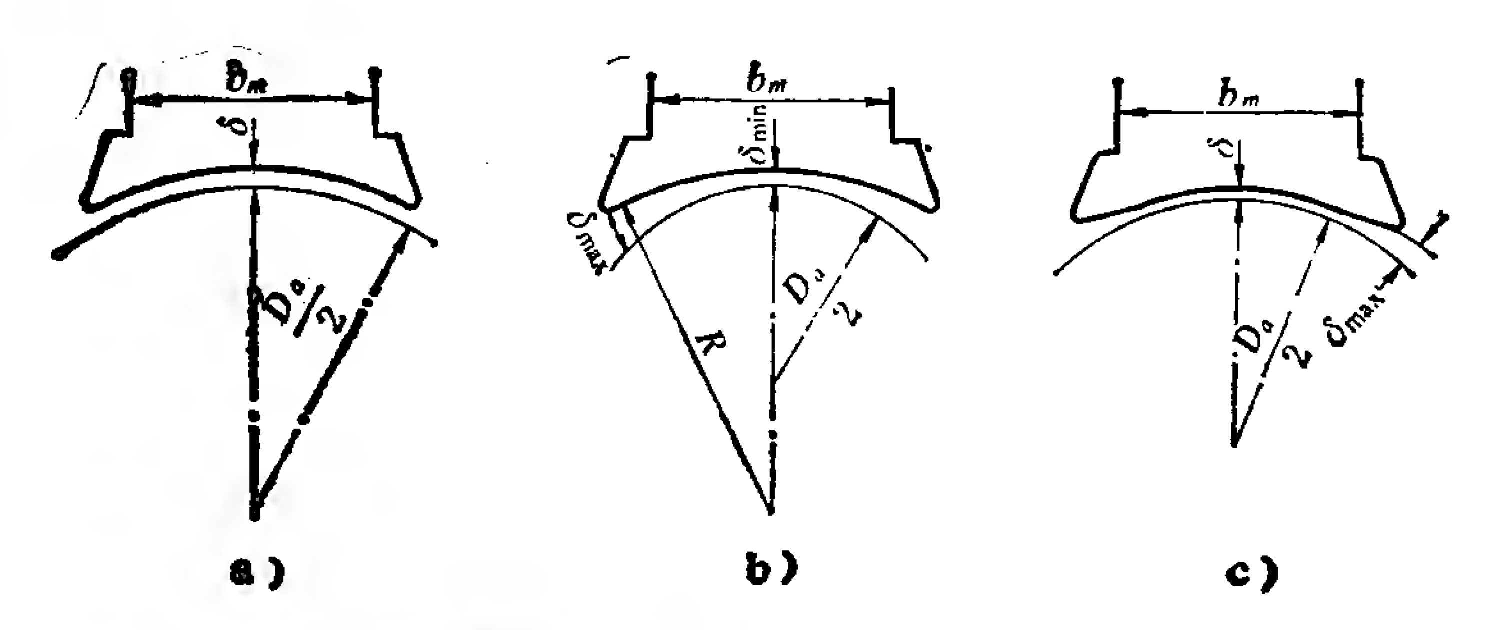


图 5-2 气隙的三种不同形式

a) 均匀气隙 b) 偏心气隙 c) 削角的均匀气隙

气隙及偏心气隙三种不同型式，如图 5-2 所示。

对于均匀气隙，其极靴圆弧与电枢外圆同心，所以在极靴范围内气隙均匀，如图 5-2a)所示。这种气隙型式主要用于带有补偿绕组的电机中，一般大、中型直流电机用得较多。

对于偏心气隙，其极靴圆弧与电枢外圆不同心，使气隙长度 δ 从主磁极中心线至极尖连续光滑地增大，见图 5-2b)。它能够比较有效地抑制电枢反应所引起的气隙磁场畸变，有利于电动机的调速，同时，比较均匀的气隙磁场可降低换向器上的最大片间电压，有利于换向。这类气隙较多用于牵引、冶金及起重电机，近年来小型直流电机也趋向于用这类气隙(例如 z_3 系列电机)。然而，采用偏心气隙后，有效气隙通常比均匀气隙为大，消耗在气隙上的磁动势也相应大一些，从而增加了励磁磁动势。

对于极尖削角的均匀气隙，其极靴圆弧虽与电枢外圆同心，但在极靴两端各有约六分之一圆弧长度变成直线，使气隙增大，极尖气隙 δ_{max} 约为磁极中间部分气隙 δ 的两倍，见图 5-2c)。削角后使极尖气隙增大，其目的也是抑制电枢反应所

引起的气隙磁场畸变。这种气隙型式常用于一般的小型直流电机中。

当气隙型式选定后，气隙长度的确定通常需要从机械和电气性能两方面考虑。

从机械加工要求出发，对于均匀气隙（包括削角的），通常，D_a 小的电机选用上述范围的低限。当采用偏心气隙时，其最大气隙长度 δ_{max} 约为最小气隙长度 δ_{min} 的 3 倍左右。

从电气性能来说，缩小气隙可减小主磁极的励磁磁动势及励磁损耗，并可缩小主磁极高度及机座尺寸。但气隙过小时会使电枢反应引起的气隙磁场畸变加剧，造成换向不良及运行不稳定，并增加主磁极表面的损耗和电机的噪声。

为此，综合机电两方面的要求，根据生产经验，气隙长度可按下式确定：

$$\delta \geqslant (0.3 \sim 0.35)\frac{A\tau}{B_\delta} \quad （有换向极） \tag{5-2}$$

$$\delta \geqslant (0.4 \sim 0.5)\frac{A\tau}{B_\delta} \quad （无换向极） \tag{5-3}$$

对于有补偿绕组的电机，由于因电枢反应所引起的气隙磁场畸变较小，气隙长度的确定只要从减小表面损耗及机械安全运转两方面考虑即可。

二、气隙磁动势的计算

在每极的总磁动势中，气隙磁动势约占 60～85%，所以应力求算得准确。通常可以认为极靴表面和电枢表面是两个等磁位面，在等磁位面的任何地方都可以计算其磁位差（即所需的磁动势），所以，一般是计算通过中心线的气隙磁动势。由于气隙长度 δ 很小，于是可以认为气隙磁通密度只有径向分量，并沿气隙长度保持不变。所以当不考虑电枢和磁极的齿槽影响时，每极的气隙磁动势可按下式计算

$$F_\delta = H_\delta \delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}\delta = 0.8B_\delta\delta \quad (安) \tag{5-4}$$

式中　H_δ——气隙磁场强度(安/厘米)；

B_δ——气隙磁通密度(高斯)；

μ_0——气隙磁导率，在 H 用安/厘米，B 用高斯时，

$\mu_0 = 0.4\pi = 1.257$(高斯·厘米/安)；

δ——气隙长度(厘米)。

而气隙磁通密度 B_δ 可按下式计算

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha'_p \tau l_\delta} \quad (高斯) \tag{5-5}$$

式中　Φ——每极气隙磁通(麦克斯韦)；

$\alpha'_p = \frac{b'_p}{\tau}$——计算极弧系数；

τ——极距(厘米)；

b'_p——主磁极计算极弧长度(厘米)；

l_δ——电枢计算长度(厘米)。

关于气隙磁通密度 B_δ 的数值范围大致如下：

对于 $2p=2$ 的小型电机，约为 5000～7000 高斯；

对于 $2p=4$ 的小型电机，约为 7000～9000 高斯；

对于中、大型电机，约为 8500～10500 高斯。

当考虑到电枢和磁极有齿槽时，气隙磁场的分布就不均匀，这时可以引入气隙系数 k_δ 来考虑其影响(关于气隙系数的分析和计算见下面)。所以，有齿槽影响时的气隙磁动势 F_δ 可按下式计算

$$F_\delta = 0.8B_\delta\delta k_\delta \quad (安) \tag{5-6}$$

由此可见，在已知每极气隙磁通和气隙长度的情况下，气隙磁动势的计算可以归结为 b'_p、l_δ 和 k_δ 三个数值的计算。下面的分析将表明 b'_p、l_δ 和 k_δ 的计算实际上就是将在空间分布

不均匀的气隙磁场化成等值的均匀磁场的过程。

1. 计算极弧长度 b'_p

若不考虑电枢表面开槽的影响，气隙磁通密度沿圆周方向的分布曲线如图 5-3 所示。

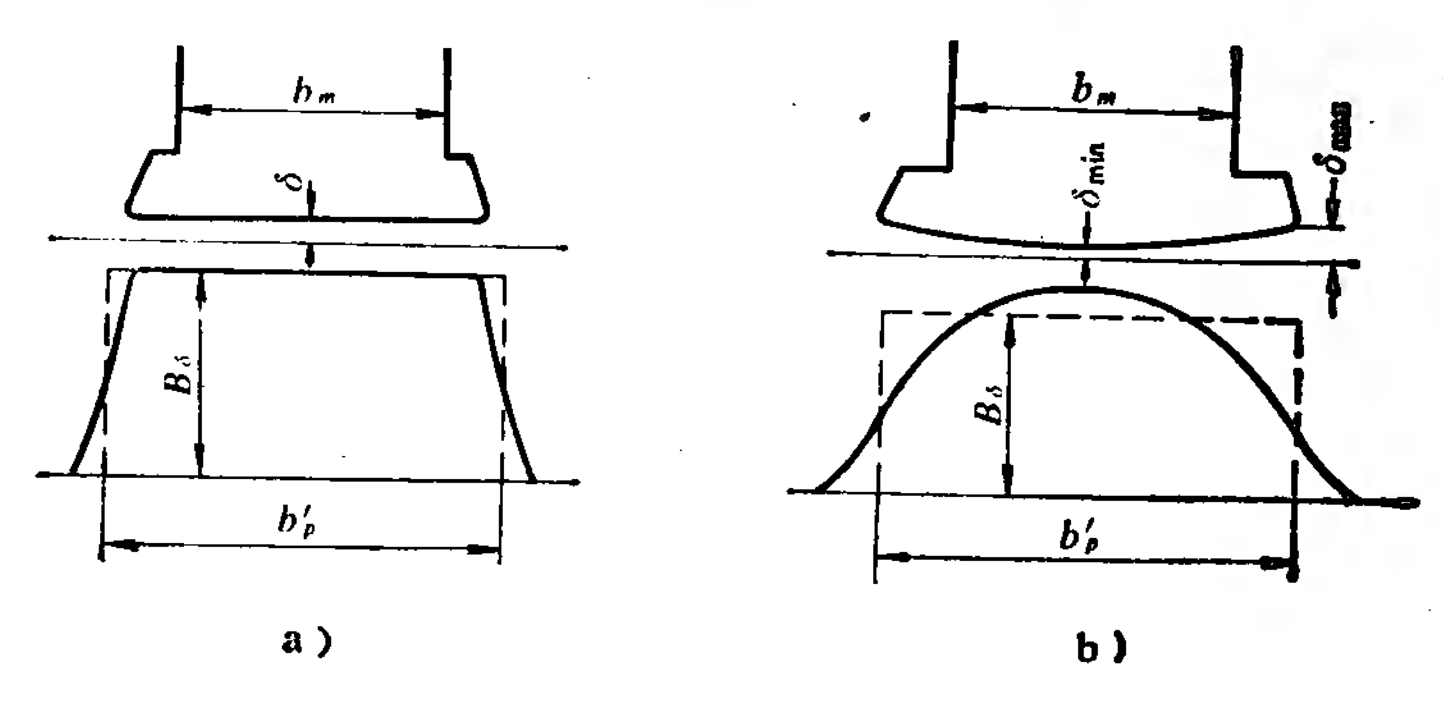


图 5-3 气隙磁通密度沿圆周方向的分布曲线
a) 均匀气隙 b) 不均匀气隙

对于均匀气隙电机，其气隙磁通密度分布如图 5-3a) 所示，考虑到在磁极边缘处磁通的扩散，计算极弧长度 b'_p 可取为

$$b'_p = b_p + 2\delta \quad (\text{厘米}) \tag{5-7}$$

式中 b_p——主磁极极弧长度(厘米)。

对于极尖削角的均匀气隙，如图 5-2c)所示，其削角部分的磁通密度与均匀气隙相比有所减小，当削角部分约占六分之一极弧长，其极尖处最大气隙长度为 2δ 时，可以认为

$$b'_p = b_p \quad (\text{厘米}) \tag{5-8}$$

此时气隙磁通密度 B_δ 取极中心的值。当然，严格说，b'_p 将随着齿饱和程度的增加而增大，随着极尖处最大气隙的增大而减小。

对于偏心气隙的电机，其气隙磁通密度分布如图 5-3b)所示，它的分布形状在很大程度上取决于齿部饱和程度，齿愈饱和，曲线愈平坦。因此，这类电机的计算极弧长度 b'_p 与实际极弧长度 b_p 之间的关系严格说来不能用确定的公式来表示。这里介绍另一种近似计算法：对于偏心气隙电机，指定其计算极弧长度 b'_p 等于实际极弧长度 b_p，即

$$b'_p = b_p \quad \text{（厘米）} \tag{5-9}$$

而其气隙长度 δ 采用等效气隙的概念，对于 $\delta_{max}/\delta_{min}$ 等于 3 左右的电机，按下式计算：

$$\delta = 0.75\delta_{min} + 0.25\delta_{max} \quad \text{（厘米）} \tag{5-10}$$

上式的物理意义是，以等值的均匀气隙 δ 来替代原来的不均匀气隙，使得气隙替代后的电机气隙磁动势及齿磁动势之和与替代前的相等。实践证明，这样替代虽有一定的误差，但对常用的偏心气隙电机，采用此法来计算其额定运行状态的磁动势还是合适的。

2. 电枢计算长度 l_δ

电枢计算长度 l_δ 严格说来是与气隙磁通密度沿轴向的分布有关，如图 5-4 所示。若径向通风沟的影响也用引入相应的气隙系数来考虑(如同处理电枢槽那样的方法)，在电枢长度 l_a 与主磁极长度 l_m 相等的情况下，可取 $l_\delta = l_a$。如果电枢长度 l_a 与主磁极长度 l_m 不相等，则电枢计算长度可取其平均值，即

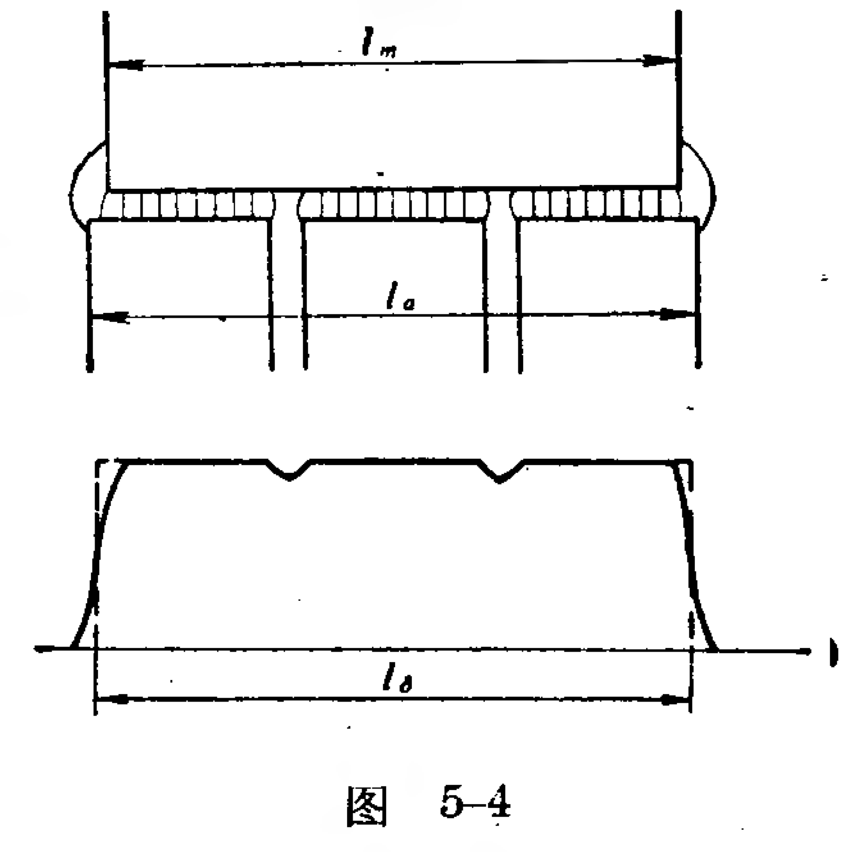


图 5-4

$$l_\delta=\frac{1}{2}(l_m+l_a)\quad(\text{厘米})\tag{5-11}$$

应该注意，此时式(5-6)中气隙系数 k_δ 应该包括通风沟的影响。

3．气隙系数

对于电枢表面有槽的均匀气隙电机，其气隙磁通密度沿圆周方向的分布如图 5-5 所示。由图可见，为了使在有槽和无槽两种情况下每极的气隙磁通保持不变，则有槽时的气隙最大磁通密度 B'_δ 将比无槽时的大。如前所述，气隙系数 k_δ 就是有槽气隙磁动势与无槽气隙磁动势的比值，因此也就等于 B'_δ 与 B_δ 的比值，即

$$k_\delta=\frac{B'_\delta}{B_\delta}\tag{5-12}$$

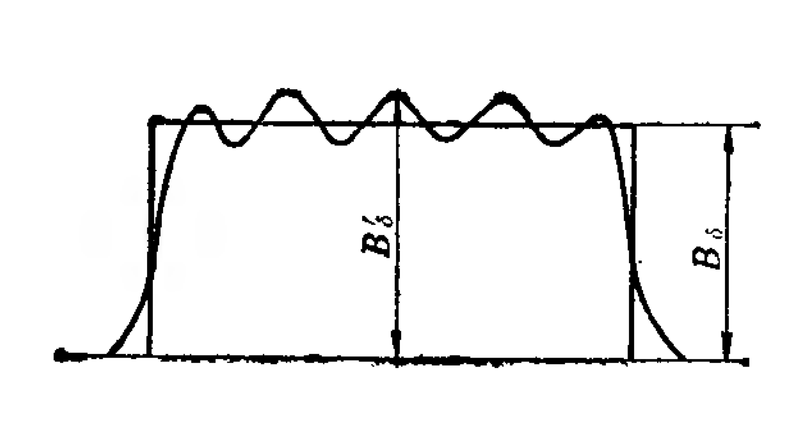


图 5-5 电枢表面有齿槽时气隙磁通密度沿圆周方向的分布

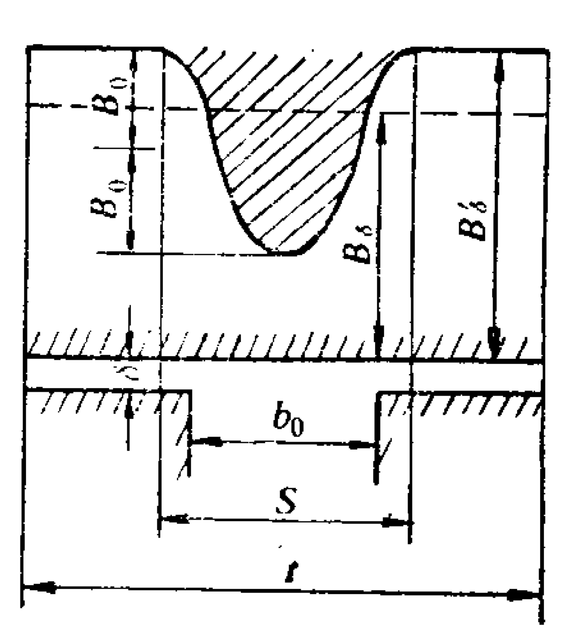


图 5-6 一个齿距内气隙磁通密度的分布

在计算 k_δ 时，通常须求出一个齿距内气隙磁通密度的分布，如图 5-6 所示。图中划斜线的面积代表电枢开槽后在一个齿距内所减少的磁通。

卡特首先采用许瓦尔兹变换得到电枢开槽时的 k_δ 的分析式。若令齿距为 t，槽口为 b_0，槽深为无限，在此齿距内的

气隙最大磁通密度为 B'_δ，平均磁通密度(即气隙磁通密度的计算值)为 B_δ，气隙磁通密度的脉振振幅为 B_0，等效宽度为 S，如图 5-6 所示，则因有

$$B'_\delta t - B_0 S = B_\delta t$$

即

$$\frac{B'_\delta}{B_\delta}\left(t - \frac{B_0}{B'_\delta} S\right) = t \tag{5-13}$$

将式(5-13)代入(5-12)得：

$$k_\delta = \frac{t}{t - \frac{B_0}{B'_\delta} S} = \frac{t}{t - \beta S} = \frac{t}{t - \beta\theta\, b_0} = \frac{t}{t - \gamma\delta} \tag{5-14}$$

式中 $\beta = \frac{B_0}{B'_\delta}$，$\theta = \frac{S}{b_0}$，$\gamma = \beta\theta\frac{b_0}{\delta}$

由更详细的分析可得

$$\gamma = \frac{4}{\pi}\left[\left(\frac{b_0}{2\delta}\right)\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{b_0}{2\delta}\right) - \ln\sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2\delta}\right)^2}\right] \tag{5-15}$$

当 $1 < \frac{b_0}{\delta} < \infty$ 时，γ 可用下面的近似公式计算

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} \tag{5-16}$$

将式(5-16)代入(5-14)得

$$k_\delta = \frac{t}{t - \frac{b_0^2}{5\delta + b_0}} \tag{5-17}$$

上述计算气隙系数的方法不仅适用于电枢槽，而且对于主磁极上的补偿槽及电枢上的径向通风沟也同样适用，只要把相应的齿槽节距和槽口宽替代式中的 t 及 b_0 即可。因此，若用 $k_{\delta1}$、$k_{\delta2}$ 及 $k_{\delta3}$ 分别表示电枢槽、补偿槽及径向通风沟的气隙系数，则它们可按下列各式计算

$$k_{\delta 1}=\frac{t_a}{t_a-\dfrac{b_0^2}{5\delta+b_0}} \tag{5-18}$$

$$k_{\delta 2}=\frac{t_c}{t_c-\dfrac{b_{0c}^2}{5\delta+b_{0c}}} \tag{5-19}$$

$$k_{\delta 3}=\frac{t_v}{t_v-\dfrac{b_v^2}{5\delta+b_v}} \tag{5-20}$$

式中　t_a、t_c、t_v——分别表示电枢槽的齿距、主磁极上补偿槽的齿距及径向通风沟的节距；

b_0、b_{0c}、b_v——分别表示电枢槽槽口宽度、主磁极上补偿槽槽口宽度及径向通风沟的宽度。

如果在电机铁心上用缠绕绑带的方法来固定电枢绕组，则绑带沟使气隙磁通密度沿轴向分布的变化亦可用相应的气隙系数来等效。由于绑带没有节距，并且沟的深度较浅，因此不适用上面导出的气隙系数公式。

若令绑带沟的数量、深度和宽度分别为 n_{bd}、h_{bd} 和 b_{bd}；在无绑带沟区域的气隙磁通密度为 B_δ，在绑带沟区域内的气隙磁通密度为 $B_{\delta\min}$；则绑带沟的气隙系数 $k_{\delta 4}$ 可用无绑带沟时的气隙磁通密度与有绑带沟时的等效气隙磁通密度之比来确定，如下式所示

$$k_{\delta 4}=\frac{(l_a B_\delta)/l_a}{[(l_a-n_{bd}b_{bd})B_\delta+n_{bd}b_{bd}B_{\delta\min}]/l_a} \tag{5-21}$$

假定气隙磁动势不变，则气隙磁通密度与气隙成反比，即

$$\frac{B_\delta}{B_{\delta\min}}=\frac{\delta+h_{bd}}{\delta} \tag{5-22}$$

将式(5-22)代入(5-21)则得

$$k_{\delta 4}=\frac{l_a}{(l_a-n_{bd}b_{bd})+n_{bd}b_{bd}\left(\frac{\delta}{\delta+h_{bd}}\right)}$$

$$=\frac{l_\delta(\delta+h_{bd})}{l_a(\delta+h_{bd})-n_{bd}b_{bd}h_{bd}}$$

$$=1+\frac{n_{bd}b_{bd}h_{bd}}{l_a(\delta+h_{bd})-n_{bd}b_{bd}h_{bd}} \tag{5-23}$$

总的气隙系数 k_δ 可将四者相乘得到

$$k_\delta=k_{\delta 1}k_{\delta 2}k_{\delta 3}k_{\delta 4} \tag{5-24}$$

5-3 电枢齿磁动势

在 5-1 节中已经说明，每极的电枢齿磁动势可按下式计算

$$F_{ta}=L_{ta}H_{ta} \quad (安) \tag{5-25}$$

式中 H_{ta}——齿的磁场强度(安/厘米)；

L_{ta}——一个齿的磁路长度(厘米)。

为了求取 F_{ta}，必须知道 H_{ta}，而 H_{ta} 与 B_{ta} 是根据材料的磁化曲线确定的，因此，要先确定齿中的磁通密度 B_{ta}，然后根据 B_{ta} 查得 H_{ta}。确定 B_{ta} 的方法如下。

在每个齿距范围内的气隙磁通为

$$\Phi_t=B_\delta l_\delta t_a \quad (麦) \tag{5-26}$$

该磁通通过一齿一槽的并联磁路而进入电枢，由于齿部的磁材料的磁导率 μ 比槽部的非导磁材料的磁导率 μ_0 大得多，所以大部分的磁通 Φ_t 从齿中通过，但是其数值却因齿的饱和程度而变。

若 b_{tax} 为对应于电枢直径为 D_x(见图 5-7)时的齿宽，则齿的截面

$$A_{tax}=k_{Fe\,a}l_{Fe}b_{tax} \quad (厘米^2) \tag{5-27}$$

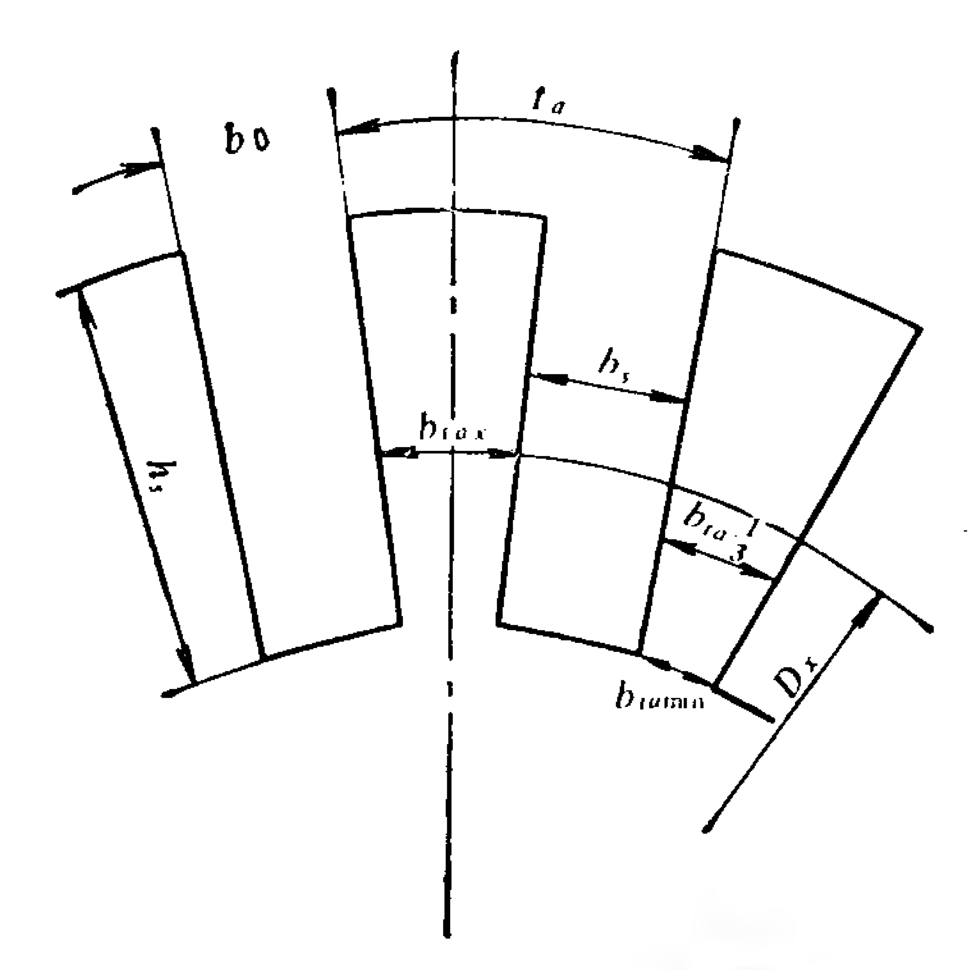


图 5-7　开口的矩形槽(平行槽)

式中　$k_{Fe\,a}$——电枢铁心的压装系数，对 0.5 毫米的硅钢片，取 0.93；

l_{Fe}——不计径向通风沟的电枢净长(厘米)。

而 l_{Fe} 可按下式计算

$$l_{Fe}=l_a-n_{vr}b_v\quad(厘米)\tag{5-28}$$

式中　n_{vr}——径向通风沟的数目；

b_v——径向通风沟的宽度(厘米)。

显然，对于平行槽的电机，齿的宽度 b_{tax} 随圆周直径 D_x 而变化。

若电枢圆周上有 z 个齿，则

$$t_{ax}=\frac{\pi D_x}{z}\quad(厘米)\tag{5-29}$$

和

$$b_{tax}=t_{ax}-b_s\quad(厘米)\tag{5-30}$$

于是，齿中的视在磁通密度(即假想气隙磁通全部进入齿

中的齿通密度)为

$$B'_{tax}=\frac{\phi_t}{A_{tax}}=\frac{B_\delta l_\delta t_a}{k_{Fe\ a}l_{Fe}b_{tax}}\quad (高斯)\qquad (5\text{-}31)$$

当 $B'_{tax}<18000$ 高斯时,电枢齿还没有饱和, μ很大,所以齿中磁通密集,而槽中磁通甚微。这时,可以假定磁通只从齿中通过。在此情况下,齿中的实际磁通密度 B_{tax} 等于视在磁通密度 B'_{tax}。于是可在磁化曲线上从 B'_{tax} 查得相应的 H_{tax}。

当 $B'_{tax}>18000$ 高斯时,就不能忽略有一小部分气隙磁通通过槽而进入电枢,此时齿中的实际磁通密度 B_{tax} 将小于 B'_{tax},从而不能在磁化曲线上从 B'_{tax} 直接查得 H_{tax}。但是,如果将磁化曲线适当改造后,仍然可以方便地从 B'_{tax} 查得 H_{tax}。这个方法说明如下。

若用 Φ_{tax} 和 Φ_{sx} 分别表示通过一个齿和一个槽的磁通,则

$$\Phi_t=\Phi_{tax}+\Phi_{sx}\quad (麦)\qquad (5\text{-}32)$$

将上式除以 A_{tax},并以 $\frac{A_{sx}}{A_{sx}}$ $(A_{sx}=b_s l_\delta)$乘以等式右边的第二项,则得

$$\frac{\Phi_t}{A_{tax}}=\frac{\Phi_{tax}}{A_{tax}}+\frac{\Phi_{sx}}{A_{tax}}\,\frac{A_{sx}}{A_{sx}}\qquad (5\text{-}33)$$

即

$$B'_{tax}=B_{tax}+B_{sx}\frac{A_{sx}}{A_{tax}}$$

$$=B_{tax}+\mu_0 H_{sx}\frac{A_{sx}}{A_{tax}}\quad (高斯)\qquad (5\text{-}34)$$

式中 $B_{sx}=\mu_0 H_{sx}$——槽中的磁通密度(高斯)。

当假定磁场的等磁位线为电枢直径 D_x 的圆周时,则

$$H_{sx}=H_{tax}\quad (安/厘米)\qquad (5\text{-}35)$$

于是式(5-34)可写成下列形式

$$B'_{ta}=B_{tax}+1.257H_{tax}k_{tx}\quad (高斯)\qquad (5\text{-}36)$$

式中　H_{tax}——在电枢直径为 D_x 时的齿截面上的磁场强度(安/厘米)；

k_{tx}——齿部校正系数。

而

$$k_{tx}=\frac{A_{sx}}{A_{tax}}=\frac{b_s l_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{tax}} \tag{5-37}$$

根据式(5-36)可以对不同的 k_{tx} 画出 B'_{tax} 与 H_{tax} 的一组关系曲线。D_{23} 硅钢片的 B'_{tax} 与 H_{tax} 的关系曲线示于图5-8，图中的曲线组所对应的 k_{tx} 有 0、0.2、0.4、…、2.0、2.2 等12个数值。这组曲线的绘制方法是：选定某个 k_{tx} 值，设某

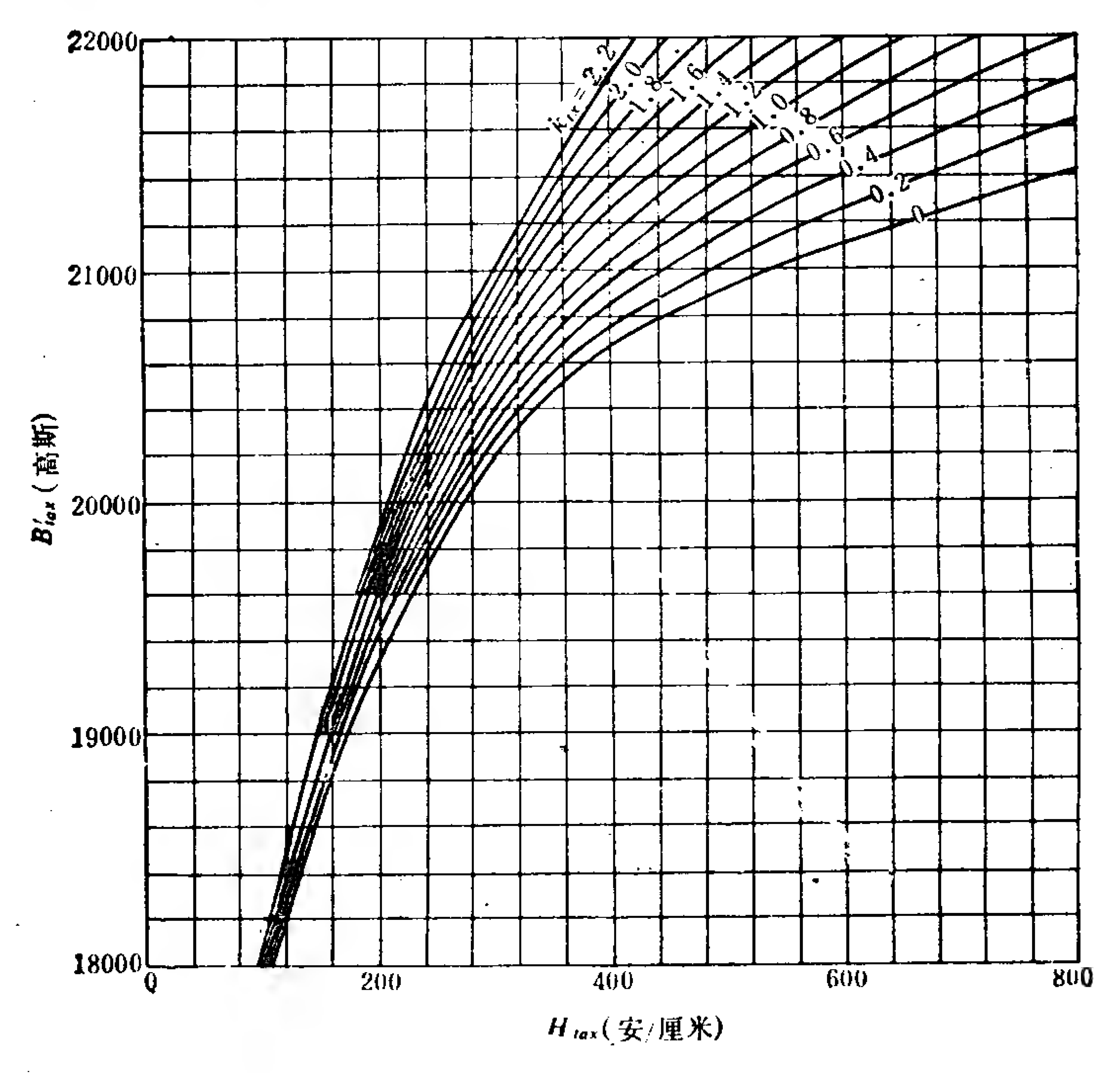


图5-8　D_{23} 硅钢片磁化曲线

点的横坐标为 H_{tax}，在 D_{23} 硅钢片的基本磁化曲线上查得对应于 H_{tax} 的磁通密度为 B_{tax}，在 B_{tax} 上再加 $1.257\,k_{tx}H_{tax}$，便得到相应的纵坐标 B_{tax}，对不同的 H_{tax} 有相应的 B'_{tax}，于是得到一条曲线。对于不同的 k_{tx}，可按照同样的方法进行，便得到一组曲线。

当有了上述的 $B'_{tax}=f(H_{tax},\ k_{tx})$ 曲线组后，只要按式(5-31)算出 B'_{tax} 和按式(5-37)算出 k_{tx}，便可从曲线组查得相应的 H_{tax}。如果需要的话，根据这个 H_{tax}，在基本磁化曲线(即 $k_{tx}=0$ 的曲线)上可查得齿中的磁通密度 B_{tax}。平行槽在齿根处的磁通密度控制在 24500 高斯以内。

对于平行槽，如图 5-7 所示，齿的截面沿着它的高度而改变，所以不同截面上的 B_{tax} 和 H_{tax} 各不相同。在这种情况下可以采用辛普生法求出近似的等效磁场强度 H_{ta}，即取最大截面、最小截面和中间截面，在这三个截面上分别求出 $B'_{ta\max}$、$B'_{ta\min}$ 和 $B'_{ta\frac{1}{2}}$，并由 $B'_{tax}=f(H_{tax},\ k_{tx})$ 曲线查得对应的 $H_{ta\max}$、$H_{ta\min}$ 和 $H_{ta\frac{1}{2}}$，而等效的磁场强度 H_{ta} 可按下面的近似公式计算：

$$H_{ta}=\frac{1}{6}(H_{ta\max}+4H_{ta\frac{1}{2}}+H_{ta\min})\quad (\text{安/厘米}) \tag{5-38}$$

为简化计算，对于平行槽还可以用距齿根 $\frac{1}{3}$ 齿高处的磁场强度 $H_{ta\frac{1}{3}}$ 作为齿的等效磁场强度，即

$$H_{ta}=H_{ta\frac{1}{3}}\quad (\text{安/厘米}) \tag{5-39}$$

对于主磁极上的平行补偿槽，其齿磁动势亦可仿此法进行计算，详见 8-2 节计算例题。

在平行槽的情况下，在计算最大、最小、中间以及在 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿截面时，相应的齿宽可按下式决定

$$
\left.\begin{aligned}
b_{ta\,\max} &= \frac{\pi D_a}{z} - b_s \quad (厘米)\\
b_{ta\,\min} &= \frac{\pi(D_a - 2h_s)}{z} - b_s \quad (厘米)\\
b_{ta\frac{1}{2}} &= \frac{b_{ta\max} + b_{ta\min}}{2} \quad (厘米)\\
b_{ta\frac{1}{3}} &= \frac{\pi\left(D_a - \frac{4}{3}h_s\right)}{2} - b_s \quad (厘米)
\end{aligned}\right\} \tag{5-40}
$$

在这种情况下，齿的磁路计算长度 L_{ta} 就是齿高，即

$$L_{ta} = h_s \quad (厘米) \tag{5-41}$$

对于半闭口梨形槽，如图 5-9 所示，由于是平行齿，即在高度 h_1 的范围内齿宽相等，故齿的磁通密度亦相等，不必求齿的等效磁场强度。在实际计算中，往往以齿中间截面上的磁通密度 $B_{ta\frac{1}{2}}$ 为代表，$B_{ta\frac{1}{2}}$ 一般控制在 17000～19000 高斯。根据 $B_{ta\frac{1}{2}}$ 在磁化曲线上可查得 $H_{ta\frac{1}{2}}$。于是



$$H_{ta} = H_{ta\frac{1}{2}} \tag{5-42}$$

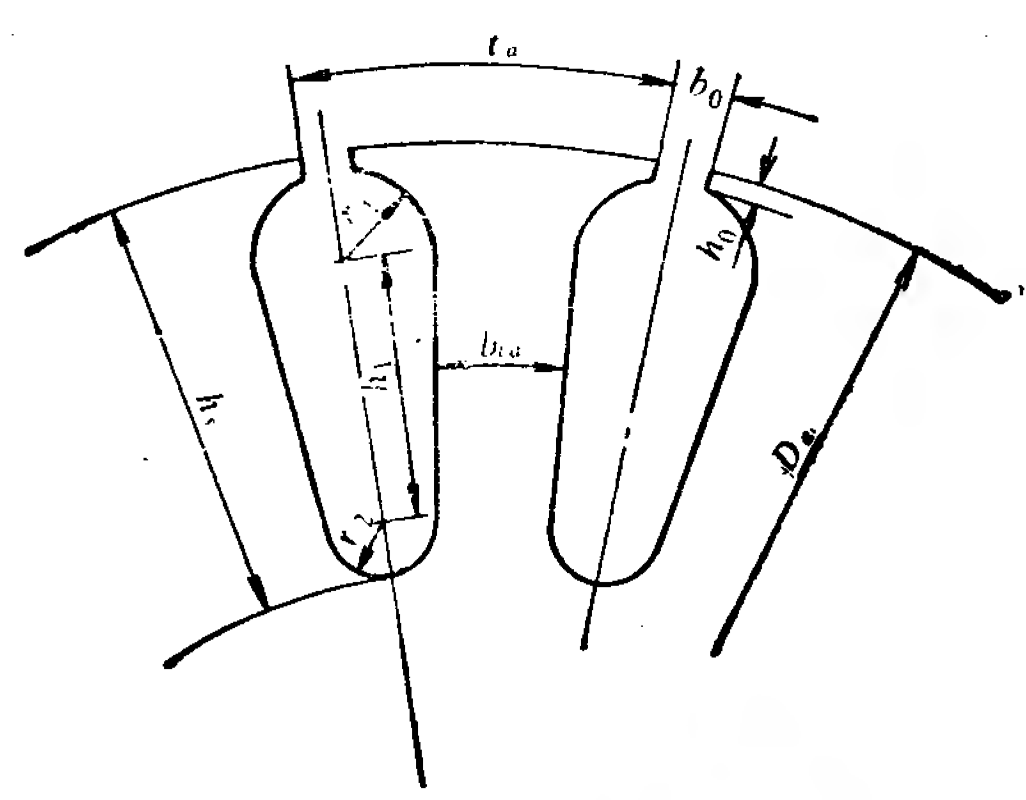


图 5-9　半闭口的梨形槽

在齿的中间截面上齿宽可按下式决定

$$b_{ta\frac{1}{2}}=t_{a\frac{1}{2}}-b_{s\frac{1}{2}}=\frac{\pi[D_a-h_1-2(h_0+r_1)]}{z}-(r_1+r_2)\quad(\text{厘米})\tag{5-43}$$

式中 h_1——齿平行部分的高度(厘米)；

$t_{a\frac{1}{2}}$, $b_{s\frac{1}{2}}$——在齿高 h_1 中间处的齿距和槽宽(厘米)；

h_0——槽口高(厘米)；

r_1——槽形上半部半圆的半径(厘米)；

r_2——槽形下半部半圆的半径(厘米)。

而

$$h_1=h_s-(h_0+r_1+r_2)\ (\text{厘米})$$

其中 h_s——槽高(厘米)。

由于梨形槽槽口 h_0 处的磁通密度甚低，在沿齿高 r_1 和 r_2 范围内的磁通密度均较中间截面上的磁通密度为低，故磁路的计算长度应小于齿高。通常一个齿的磁路计算长度取为

$$L_t=h_1+\frac{2}{3}(r_1+r_2)\quad(\text{厘米})\tag{5-44}$$

最后，尚需指出，对于偏心气隙的电机，在采用等效气隙近似计算时，由于其齿磁通密度是从等效的气隙磁通密度出发来进行计算，而不管其极中心处实际的齿磁通密度是多少，因此，偏心气隙电机的齿磁动势计算仍可采用均匀气隙电机的计算方法。

5-4 电枢轭磁动势

每极主磁通 Φ 从气隙经过电枢齿、槽后，将平分左、右两路进入电枢轭部，所以电枢轭部最大磁通 Φ_{ja} 可按下式计算

$$\Phi_{ja}=\frac{\Phi}{2}\quad(\text{麦})\tag{5-45}$$

由图 5-10 可见，经过电枢轭部各个截面的磁通是有所不同的，在中间部分（如 bb 截面）的电枢轭部磁通最大（等于 Φ_{ja}），而在主磁极下面部分（如靠近 aa 截面）的电枢轭部磁通较小。因此，在计算电枢轭部磁路时，对电枢轭的中间部分和极下部分应分别计算，然后把它们加起来，得到电枢轭磁动势。但在实际计算中，对于四极及以上的电机，由于轭部磁路的计算长度不长，轭部的磁通密度不高，所以它的磁动势在整个磁路的磁动势中所占的比率较小，因而可以采用较粗略的计算方法，即认为轭部截面的磁通密度都等于轭部最大磁密。于是，

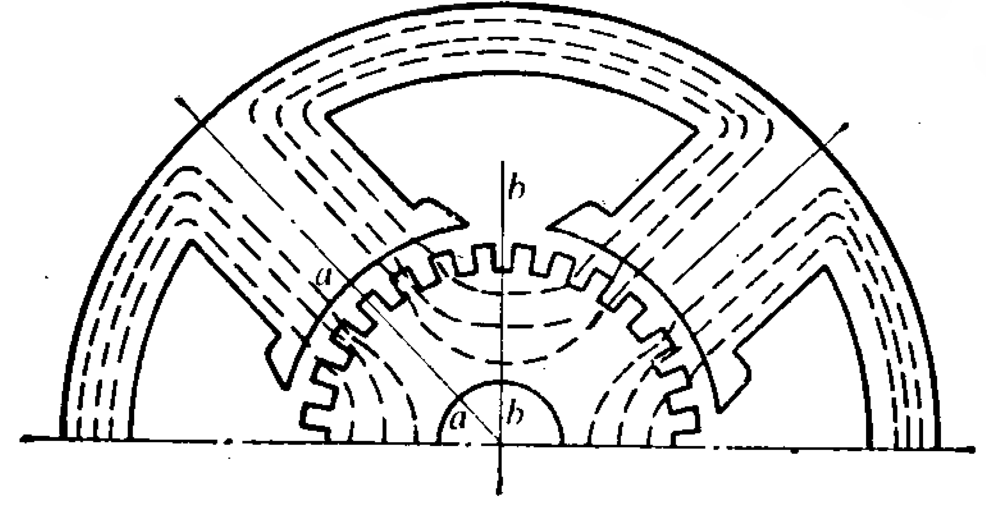


图 5-10　电枢轭部磁通分布示意

$$B_{ja}=\frac{\Phi_{ja}}{A_{ja}}=\frac{\Phi}{2k_{\mathrm{Fe}\,a}h_{jay}l_{\mathrm{Fe}}}\quad（高斯）\qquad(5\text{-}46)$$

式中　h_{jay}——电枢轭部的有效高度(厘米)。

对于梨形槽，

$$h_{jay}=h_{ja}+\frac{1}{3}r_2\quad（厘米）\qquad(5\text{-}47)$$

对于矩形槽，

$$h_{jay}=h_{ja}-\frac{2}{3}md_v\quad（厘米）\qquad(5\text{-}48)$$

其中　h_{ja}——电枢轭的实际高度(厘米)；

d_v——轴向通风孔直径(厘米)；

m——轴向通风孔排数。

轭部磁通密度的范围见第三章 3-4 节。根据磁通密度 B_{ja} 查磁化曲线得到 H_{ja} 后，则电枢轭每极的磁动势 F_{ja} 便可按下式求得：

$$F_{ja}=H_{ja}L_{ja} \quad (\text{安}) \tag{5-49}$$

式中 L_{ja}——电枢轭部磁路计算长度(厘米)。

由于所计算的是每极磁动势，所以电枢轭磁路的长度 L_{ja} 应为两个主磁极中心线间的平均长度的一半，即

$$L_{ja}=\frac{\pi(D_a-2h_s-h_{ja})}{4p} \quad (\text{厘米}) \tag{5-50}$$

对于两极电机，因为轭部磁路的计算长度相对地比较长，电枢轭部磁通密度也较大，因此分成两段进行计算较为合适。其算法如下。

先认为在极弧范围内电枢轭部的磁通密度为

$$B_{ja1}=\frac{2}{3}B_{ja}$$

而极间范围内的电枢轭部磁通密度为 $B_{ja2}=B_{ja}$，然后根据 B_{ja1} 和 B_{ja2} 分别查得 H_{ja1} 和 H_{ja2}；据此，按下式求取电枢轭每极的磁动势

$$F_{ja}=H_{ja1}L_{ja1}+H_{ja2}L_{ja2} \quad (\text{安}) \tag{5-51}$$

式中 $L_{ja1}=\alpha_p L_{ja}$——极弧范围内电枢轭磁路计算长度(厘米)；

$L_{ja2}=(1-\alpha_p)L_{ja}$——极间范围内电枢轭磁路计算长度(厘米)。

5-5 主磁极磁动势

一、漏磁系数

由图 5-1 可见，在电机中除了虚线 1、2 所示的主磁通以

外，还存在分散在极间空间自行闭合的磁通，如图中虚线3、4所示。由于这些磁通不进入电枢，因而不能在电枢绕组内感应电动势和产生电磁转矩，所以称之为漏磁通。

若用Φ_σ表示漏磁通，Φ_m表示主磁极磁通，则它们与主磁通Φ有如下关系

$$\Phi_m=\Phi+\Phi_\sigma=\left(1+\frac{\Phi_\sigma}{\Phi}\right)\Phi=\sigma\Phi \quad (\text{麦}) \qquad (5\text{-}52)$$

式中 $\sigma=1+\frac{\Phi_\sigma}{\Phi}$——漏磁系数。

漏磁系数σ与主磁极的尺寸、形状以及磁路的饱和程度等因素有关。极数多的电机，因极间空间相对地比较窄，漏磁系数σ就会稍大一些。虽然漏磁系数可以用数值计算法或图解法比较精确地算出来，但实际计算时可以按下面的经验数据选用。

对于一般中、小型直流电机，在$2p=2$时，取$\sigma=1.15$；在$2p\geqslant4$时，取$\sigma=1.20$；

对于大、中型电机，取$\sigma=1.15\sim1.20$。

二、磁极形状及尺寸的确定

要进行磁极磁动势的计算，首先要确定磁极极身的尺寸和极靴的形状。在中、小型直流电机中，磁极通常是由厚为1毫米的A3钢片或DT1电工低碳钢片叠成的，这主要是为了减少极靴表面的附加损耗。

极身的长度l_m和极靴的长度l_p通常与电枢长度l_a相等，即

$$l_m=l_p=l_a \quad (\text{厘米}) \qquad (5\text{-}53)$$

为了使磁极中消耗的磁动势不致过大，通常主磁极的磁通密度B_m应在13000～17000高斯范围内选用，采用导磁性能较好的DT1电工钢片时，可选上限值。

当选定 B_m 值后，便可确定极身宽度

$$b_m \geqslant \frac{\sigma \Phi}{k_{\mathrm{Fe}\,m} l_m B_m} \quad (\text{厘米}) \tag{5-54}$$

式中 $k_{\mathrm{Fe}\,m}$——主磁极冲片压装系数，对于1毫米厚的叠片，可取0.95。

主磁极的高度 h_m 可按下面经验公式估算

$$\left.\begin{aligned} &\text{当 } 2p=2 \text{ 时，} h_m=(0.4\sim0.5)b'_p\ (\text{厘米}) \\ &\text{当 } 2p=4 \text{ 时，} h_m=(0.7\sim0.9)b'_p\ (\text{厘米}) \end{aligned}\right\} \tag{5-55}$$

或者按照下面经验公式估算

$$h_m=(0.45\sim0.55)D_a \quad (\text{厘米}) \tag{5-56}$$

应当指出，由于主磁极极间的空间要安装励磁绕组，并且还需留有一定的极间空隙以便通风，因此主磁极的实际高度要在励磁绕组的尺寸决定后，才能最后确定。

主磁极极身的尺寸初步确定后，进一步就可以决定极靴形状，参见图5-11。当极靴削角时，在极弧中间部分$\left(\text{约占}\ \frac{2}{3}b_p\right)$的极靴与电枢间的气隙保持不变，都等于$\delta$，而在这段范围以外将弧形改成直线，使气隙由$\delta$逐渐增大至$2\delta$(在极尖处)。当极弧与电枢表面偏心时，极弧的半径比电枢半径大，并且两者不同心，使气隙从极靴中心处的$\delta_{\min}$逐渐增大至极尖处的$\delta_{\max}$。

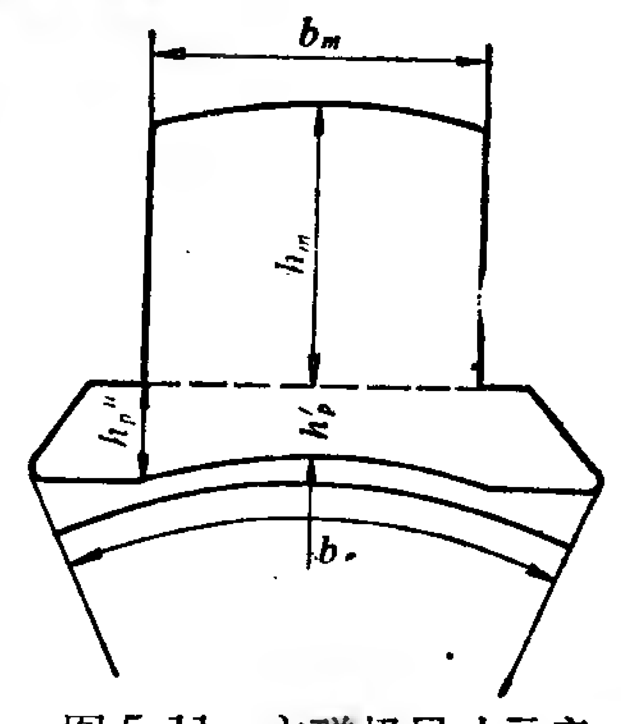


图5-11 主磁极尺寸示意

极靴两端肩胛处的高度h''_p(见图5-11)应有足够的尺寸，使通过这个截面的磁通密度不超过20000高斯，以便主极磁

通能顺利地通过这个截面而达到极尖处，即

$$h''_p \geqslant \frac{\frac{1}{2}B_\delta(b'_p - b_m)l_\delta}{l_p 20000} \quad (厘米) \tag{5-57}$$

为了避免励磁绕组与电枢相擦，通常使 $h'_p \geqslant 0.5$(厘米)。

三、主磁极磁动势的计算

据初步确定的主磁极形状和尺寸，可以按下式计算主磁极的磁通密度

$$B_m = \frac{\sigma\Phi}{k_{\text{Fe}\,m} b_m l_m} \quad (高斯) \tag{5-58}$$

由 B_m 可从主磁极所选用的材料的磁化曲线查得 H_m，于是每极的主磁极磁动势为

$$F_m = H_m L_m \quad (安) \tag{5-59}$$

式中　L_m——每个主磁极的磁路计算长度(厘米)，通常取 $L_m = h_m$。

5-6　机座轭磁动势

一、机座尺寸的确定

要确定机座尺寸，首先要计算额定情况时经过机座轭的磁通量，并按预计机座轭的磁通密度求出它的导磁截面积 S_j，然后根据机座长度确定机座厚度。

由于主磁极极身的磁通分两路进入机座轭（见图 5-10），所以机座轭部的磁通为 $\frac{1}{2}\Phi_m$。若令 B'_j 为机座轭部磁通密度的初选值，则机座截面

$$A_j = \frac{\frac{1}{2}\Phi_m}{B'_j} = \frac{\sigma\Phi}{2B'_j} \quad (厘米^2) \tag{5-60}$$

对于铸钢或钢板制成的机座，B'_j 可在 9500～13000 高斯

范围内选用；对于叠片机座，B'_j 可在 11000～15000 高斯范围内选用。

机座轴向长度 l_j，从结构要求来说，它至少能覆盖励磁绕组的端接部分，一般可取

$$l_j=(1.6\sim2.2)l_a \quad (\text{厘米}) \tag{5-61}$$

由式(5-60)和(5-61)可得机座厚度

$$h_j=\frac{A_j}{l_j}=\frac{\sigma\Phi}{2B'_jl_j} \quad (\text{厘米}) \tag{5-62}$$

此时机座的内、外径分别为

$$D_{ij}=D_a+2\delta+2h_m \quad (\text{厘米}) \tag{5-63}$$

$$D_j=D_a+2\delta+2h_m+2h_j \quad (\text{厘米}) \tag{5-64}$$

二、机座轭磁动势计算

机座尺寸决定后，便可进行机座轭磁动势的计算。首先求出机座轭部的磁通密度

$$B_j=\frac{\sigma\Phi}{2h_jl_j} \quad (\text{高斯}) \tag{5-65}$$

由机座所选用材料的磁化曲线查得 H_j，并按下式求取每极机座轭部的磁路长度

$$L_j=\frac{\pi(D_j-h_j)}{4p} \quad (\text{厘米}) \tag{5-66}$$

每极的机座轭磁动势则为

$$F_j=L_jH_j \quad (\text{安}) \tag{5-67}$$

5-7 空载特性与电枢反应去磁磁动势的计算

一、空载特性曲线

电机空载时的气隙磁通与每极励磁磁动势的关系曲线称为空载特性曲线。计算方法是先算出额定主磁通 Φ_N 即额定

转速和额定电压时的空载磁通

$$\Phi_N=\frac{60E_a a}{N_a p n_N}\times10^{+8}\quad(\text{麦})\qquad(5\text{-}68)$$

然后在 $0.5\Phi_N$ 至 $1.2\Phi_N$ 的范围内取五、六个不同磁通值，按前几节所述的方法算出对应于每个磁通值所需的每极磁动势 F，即

$$F=F_\delta+F_{ta}+F_{tc}+F_{ja}+F_m+F_j\quad(\text{安})\qquad(5\text{-}69)$$

式中 F_{tc}——补偿齿磁动势，其计算方法与 F_{ta} 相似。把 Φ 与 F 的关系 $\Phi=f(F)$ 绘成曲线，便得到空载特性曲线，如图 5-12 所示。由于电枢的感应电动势 E 与 Φ 成正比，而每极磁动势 F 与励磁电流 I_f 成正比，因此，空载特性也可以用感应电动势 E 与励磁电流 I_f 的关系来表示，即 $E=f(I_f)$。

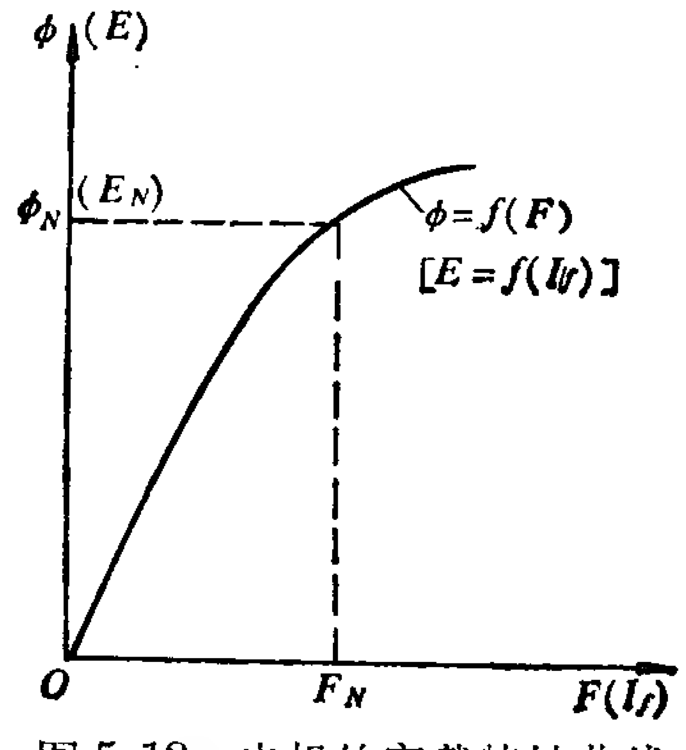


图 5-12　电机的空载特性曲线

空载特性曲线可以用来校核磁路各部分所选择的磁通是否合适。在空载时的额定电压处，正常直流电机的气隙磁动势 F_δ 应为总磁动势 F 的 0.65 至 0.80。

二、电枢反应去磁磁动势的计算

1．过渡特性曲线

过渡特性曲线是气隙磁通密度对于每极的气隙磁动势和齿磁动势之和的关系曲线，即 $B_\delta=f(F_\delta+F_t)$，如图 5-13 所示。这里的齿磁动势 F_t 应包括电枢齿磁动势 F_{ta} 和补偿齿磁动势 F_{tc} 之和。根据磁路计算的数据，可以绘出过渡特性

曲线，利用这条曲线可以方便地确定交轴电枢反应去磁磁动势。

2．交轴电枢反应去磁磁动势的计算

对于均匀气隙的直流电机，在空载时，极弧下的气隙磁通密度 B_δ 可以看作处处相等。但在负载时，电枢绕组中流过电流，电枢磁动势将造成气隙磁场畸变。即使对于电刷位置放在几何中性线上的直流电机，由于磁路的饱和，电枢反应的磁动势会使半个极下气隙磁场的增强小于另外半个极下气隙磁场的减弱，因此，总的效应是去磁的。这个交轴电枢反应的去磁作用将使电机在负载时的主磁通减少。若将这个交轴电枢反应去磁作用折算成等效的主极每极磁动势，这就称为交轴电枢反应去磁磁动势。

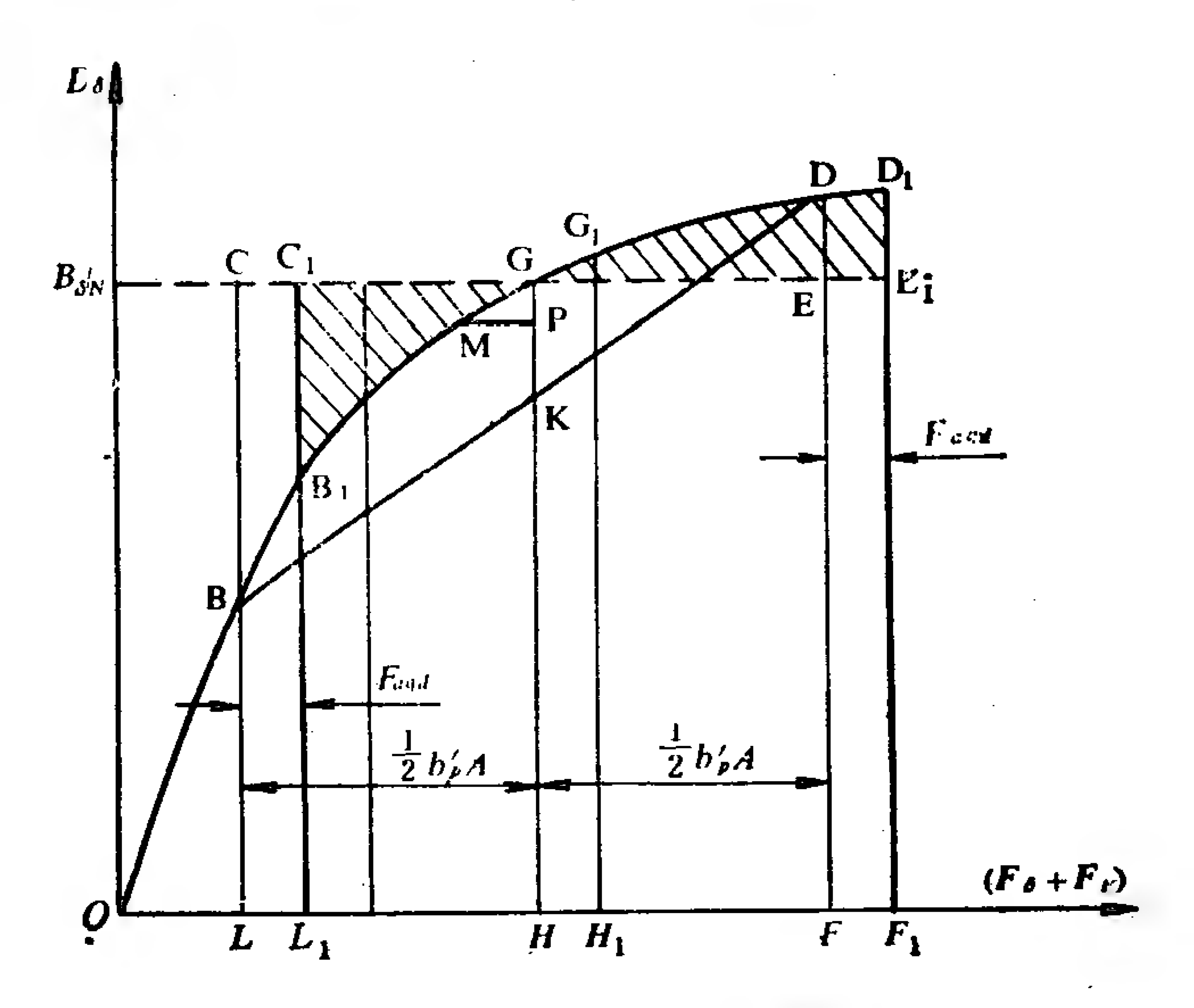


图 5-13　过渡特性曲线及交轴电枢反应去磁磁动势的求取

交轴电枢反应去磁磁动势可以用过渡特性来求取，其求法如下。

(1) 移动面积法

在方格纸上，画出如图 5-13 所示的过渡特性曲线。在纵轴上取一点对应于额定电压时的气隙磁通密度 $B_{\delta N}$，从这点作平行于横轴的直线 CE_1，交过渡特性曲线于 G 点，过 G 点作垂直于横轴的线，交横轴于 H 点，在 H 点两侧的横轴上分别取 L 和 F 两点，并且使

$$LH = FH = \frac{1}{2} b'_p A \tag{5-70}$$

式中　A——额定负载时的电负荷(安/厘米)。

再从 L 和 F 两点各自作横轴的垂线，分别交过渡特性曲线于点 B、D；而交直线 CE_1 于点 C 和 E。由于交轴电枢磁动势从主极中心线向两侧极尖是按线性规律变化的，而且在主极中心线处为零，在两侧极尖处分别为 $\frac{1}{2} b'_p A$ 和$\left(-\frac{1}{2} b_p A\right)$，若在图 5-13 上以 OH 表示由主磁极励磁绕组产生的而消耗在气隙和齿上的每极磁动势，则 OL 表示被交轴电枢反应去磁后极尖处的合成磁动势，而 OF 表示被交轴电枢反应增磁后极尖处的合成磁动势。相应的 LB 和 FD 表示两个极尖下的气隙磁通密度，而曲线段 BGD 表示电机在负载时一个极靴下的气隙磁通密度分布。由图可见，若用矩形 LCEF 表示空载时的气隙磁通，则曲线梯形 LBDF 则表示负载时的气隙磁通，两者之差即交轴电枢反应去磁磁通。为了探求交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqd}，只要将线段 LF 向右平移一段距离到 L_1F_1 的位置，并使两块阴影部分的曲边三角形面积相等，即

$$\text{曲边}\ \triangle C_1B_1G = \text{曲边}\ \triangle D_1E_1G \tag{5-71}$$

这样就可以得到另一个曲边梯形 $L_1B_1D_1F_1$，它的面积等于矩形 LCEF，即等于空载气隙磁通。因此，线段 LF 向右移动的距离 LL_1 就是交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqd}，即

$$F_{aqd}=LL_1 \tag{5-72}$$

(2) 计算法

假定曲线段 BGD 按抛物线规律变化，则曲边梯形 LBDF 的面积可用底边为 LF、高为 $B_{\delta av}$ 的矩形来表示，而 $B_{\delta av}$ 可按辛普生法计算如下：

$$B_{\delta av}=\frac{1}{6}(LB+4HG+FD) \tag{5-73}$$

由于交轴电枢反应导致平均磁通密度的减小为

$$\Delta B_\delta=B_{\delta N}-B_{\delta av}=HG-\frac{1}{6}(LB+4HG+FD)$$

$$=\frac{1}{6}(BC-DE) \tag{5-74}$$

从而求得由于交轴电枢反应所引起的磁通减小量为

$$\Delta\Phi=\Delta B_\delta b'_p l_\delta \tag{5-75}$$

将 LF 线段移至 L_1F_1 的位置后，表示励磁磁动势增加 F_{aqd}，而相应的气隙磁通也增加 $\Delta\Phi$，该磁通增量对应于两个小的曲边梯形 BCC_1B_1 和 DD_1E_1E，即

$$\Delta\Phi=(\text{曲边梯形 } BCC_1B_1+\text{曲边梯形 } DD_1E_1E)\frac{l_\delta}{A}$$

$$\approx(BC\,F_{aqd}+DE\,F_{aqd})\frac{l_\delta}{A} \tag{5-76}$$

将式(5-74)和(5-76)代入(5-75)得

$$F_{aqd}=\frac{1}{6}\,\frac{(BC-DE)}{(BC+DE)}\,b'_pA \tag{5-77}$$

(3) 作图法

在图 5-13 中，连接 BD，交 GH 于 K 点，由几何关系得：

$$GK = HG - HK = HG - \frac{1}{2}(BL + DF)$$

$$= \frac{1}{2}(BC - DE) \tag{5-78}$$

在 GK 上取一点 P，且使

$$GP = \frac{1}{3}GK \tag{5-79}$$

将式(5-74)及(5-78)代入(5-79)得

$$GP = \Delta B_{\delta} \tag{5-80}$$

过 P 点作水平线，交 BGD 曲线于 M 点，M 点的纵坐标即 $B_{\delta av}$，M 点的横坐标即相应于因去磁作用每极磁通减少后的磁动势。为了补偿去磁作用，磁极应该增加的磁动势为 PM，于是，交轴电枢反应的每极去磁磁动势为

$$F_{aqd} = PM \tag{5-81}$$

上面三种求取交轴电枢反应的去磁磁动势的方法是在均匀气隙的条件下推导出来的，因此严格说来只适用于均匀气隙的直流电机。对于不均匀气隙的直流电机，关系比较复杂，可以借助于磁场的数值解法来求取。但是，在实际计算中，对于不均匀气隙的电机，采用等效气隙的替代后，仍可用上述方法作近似计算。

以上计算法或作图法所用的过渡特性曲线亦可近似用 $\Phi = f(F)$ 的空载特性曲线代替。

5-8 串励绕组和并(他)励绕组的计算

直流电机主磁极的励磁绕组有并励绕组和串励绕组两种，每台电机根据对性能的要求或者只装并励绕组，或者只装串励绕组，或者兼有并励和串励绕组。对于一般用途的直流电机，主要是用并励绕组产生主磁场，但有时也带有匝数较少

的串励绕组。这个匝数较少的串励绕组，在负载时一般使它具有助磁作用，因此对发电机来说，可以减少其电压变化率；对电动机来说，可调整其转速变化率。对有些并励电动机来说，为了使其转速变化率为正值，即转速特性不致出现上翘，也装有匝数很少的串励绕组，以补偿负载时的电枢反应去磁磁动势，这种串励绕组的作用在于稳定转速，故有时也称稳定绕组。

一、串励绕组的计算

对于串励电动机，串励绕组所需的磁动势为 $F_s=F_N+F_{aqd}$；对于积复励电动机或发电机，串励绕组所需的磁动势为 $F_s>F_{aqd}$；对于并励电动机，用于稳定转速的串励绕组所需的磁动势 $F_s\approx F_{aqd}$，由转速变化率决定。上式中 F_N 代表对应于空载额定电压、额定转速时的励磁磁动势，F_{aqd} 代表额定负载时的交轴电枢反应每极去磁磁动势。

串励绕组的匝数通常按下式确定

$$W_s'=\frac{F_s}{I_a} \tag{5-82}$$

为了便于绕制，应将上式计算得到的 W_s' 调整到整数匝或整数匝加半匝，作为实际采用的每极串励绕组匝数 W_s。此时每极实际的串励磁动势为

$$F_s=W_sI_a \quad (安) \tag{5-83}$$

串励绕组中导线的截面积通常按下式初步选取

$$A_s'=\frac{I_a}{J_s'} \quad (毫米^2) \tag{5-84}$$

式中 J_s'——串励绕组预选的电流密度，对铜线采用 $J_s'=4\sim5.5$ 安/毫米²；对铝线取 $J_s'=2.4\sim3.3$ 安/毫米²。

由式(5-84)算得的 A'_s 应按线规表圆整为 A_s。通常，对于截面小的导线，采用QZ高强度聚酯漆包圆导线；对于截面较大的导线，采用SBECB双玻璃丝包扁导线或TBR扁裸铜排(匝间嵌入绝缘材料)。

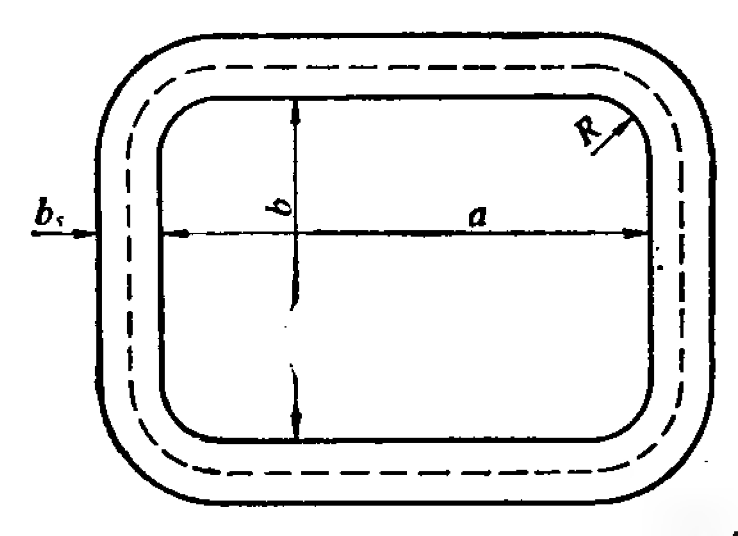


图 5-14 串励绕组平均匝长计算

串励绕组的实际电流密度则为

$$J_s=\frac{I_a}{A_s}(\text{安/毫米}^2) \quad (5\text{-}85)$$

串励绕组的平均匝长可按图 5-14 计算

$$l_{sav}=2[(a-2R)+(b-2R)]+2\pi\left(R+\frac{b_s}{2}\right)$$
$$=2(a+b)+\pi b_s-1.72R \quad (5\text{-}86)$$

式中 $a=l_m+0.6$——线圈内框长度(厘米)；

$b=b_m+0.6$——线圈内框宽度(厘米)；

0.6——线圈和铁心之间两边绝缘、空隙和框架厚度之和；

R——线圈圆角处半径，一般为 0.5 厘米；

b_s——线圈宽度(厘米)，按实际的绕组排列计算。

串励绕组的重量可按下列两式计算

对于铜线

$$G_{Cu\,s}=2pW_sl_{sav}A_s\times 8.9\times 10^{-5} \quad (\text{公斤}) \quad (5\text{-}87)$$

对于铝线

$$G_{Al\,s}=2pW_sl_{sav}A_s\times 2.7\times 10^{-5} \quad (\text{公斤}) \quad (5\text{-}88)$$

串励绕组的电阻可按下式计算

$$R_s=\frac{2pW_sl_{sav}\rho_s}{S_s} \quad (\text{欧}) \quad (5\text{-}89)$$

式中　ρ_s——绕组的电阻率(欧·毫米²/厘米)，

对于铜线：$\rho_{s.75°C}=2.17\times10^{-4}$(E、B 级绝缘)，

$\rho_{s.115°C}=2.45\times10^{-4}$(F、H 级绝缘)；

对于铝线：$\rho_{s.75°C}=3.46\times10^{-4}$(E、B 级绝缘)，

$\rho_{s.115°C}=3.92\times10^{-4}$(F、H 级绝缘)。

二、并(他)励绕组的计算

无论是发电机或电动机，并（他）励绕组的励磁磁动势可按下式计算

$$F_f=F_N+F_{aqd}-F_s\quad(安)\tag{5-90}$$

如果没有串励绕组帮助励磁，则可令上式中 $F_s=0$。

在给定励磁电压 U_f(对并励电机，$U_f=U_N$) 和磁动势 F_f 的条件下，并励绕组的设计不能从选择匝数 W_f 出发，而应从决定导线截面 A_f 出发，这是因为

$$F_f=W_fI_f=W_f\frac{U_f}{R_f}=W_f\frac{U_f}{\dfrac{2pW_fl_{fav}\rho_f}{A_f}}=\frac{U_fA_f}{2pl_{fav}\rho_f}\tag{5-91}$$

式中　W_f——并励绕组每极的匝数；

l_{fav}——并励绕组的平均每匝长度(厘米)；

A_f——并励绕组导线的截面积(毫米²)；

ρ_f——并励绕组的导线电阻率(欧·毫米²/厘米)。

而 l_{fav} 是基本不变的(因磁极尺寸已经决定)，由式 (5-91) 可见，F_f 只随 A_f 而变。也就是说，当发现并励绕组的磁动势不足或富裕时，在设计上只能调整绕组导体的截面 A_f，直到满足要求为止。在截面 A_f 不变下，把匝数 W_f 增减，显然 R_f 亦随之增减，并励电流 I_f 成反比地变化，从而励磁磁动势保持不变。在这种情况下，由于 I_f 的增减，会影响励磁功率和绕组的温升。

并励绕组设计可按下列步骤进行：

1．估算线圈平均匝长

$$l'_{fav}=2.4(l_m+b_m+1.2)\quad（厘米）\tag{5-92}$$

2．预计导线截面积

$$A'_f=\frac{2pl'_{fav}F_f\rho_f kk'_f}{U_f}\quad（毫米^2）\tag{5-93}$$

式中 k——考虑到并励绕组实际工作温度高于标准工作温度时的系数；

k'_f——励磁余量预计值，对电动机取 1.05～1.10；对发电机取 1.2～1.25。

根据 A'_f 选用相近截面积的标准线规，其截面为 A_f。

3．预选励磁绕组的电流密度 J'_f

对铜导线 J'_f 取 3～5 安/毫米²；对铝导线 J'_f 取 1.8～3 安/毫米²。由此得励磁电流

$$I'_f=A_f\cdot J'_f\tag{5-94}$$

4．并励绕组的每极匝数

先按下式估算：

$$W'_f=\frac{F_f}{I'_f}\tag{5-95}$$

再取相近于 W'_f 的整数 W_f，即得每极匝数为 W_f。

此时实际的额定励磁电流为

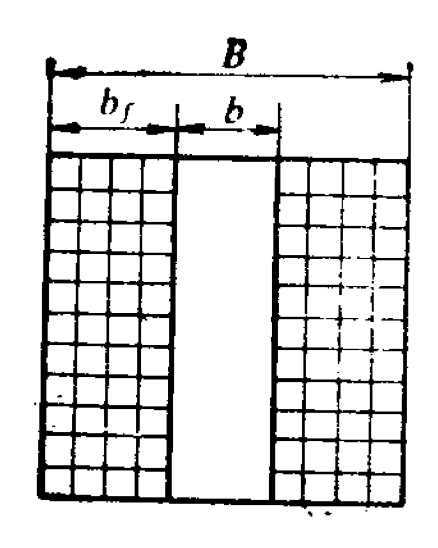
$$I_{fN}=\frac{F_f}{W_f}\quad（安）\tag{5-96}$$

额定运行时的实际电流密度

$$J_f=\frac{I_{fN}}{A_f}\quad（安/毫米^2）\tag{5-97}$$

5．励磁绕组的排列及实际平均匝长计算

励磁绕组的外形尺寸如图 5-15 所示。



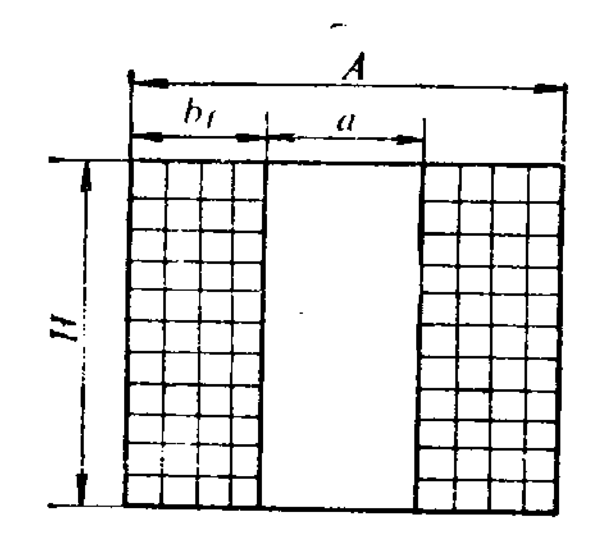


图 5-15　励磁绕组的外形尺寸

线圈内框尺寸：

$$a = l_m + 0.6 \quad (厘米) \tag{5-98}$$

$$b = b_m + 0.6 \quad (厘米) \tag{5-99}$$

$$高度\ H = (绝缘导线直径 \times 每层匝数)\alpha + 0.05 + 0.17 \quad (厘米) \tag{5-100}$$

$$宽度\ B = 2b_f + 0.05 + b \quad (厘米) \tag{5-101}$$

$$长度\ A = 2b_f + 0.05 + a \quad (厘米) \tag{5-102}$$

式中　0.05——外包玻璃丝带平绕一层的厚度；

0.17——引出线绝缘及引线片厚度；

b_f——并励线圈宽度，其值为绝缘导线直径×每极层数×α(厘米)；

α——松散系数，按材料、线径大小选用，一般为1～1.08。

由此得并励(他励)绕组的实际平均匝长

$$l_{fav} = 2(l_m + b_m + 1.2) + \pi b_f - 1.72R \quad (厘米) \tag{5-103}$$

式中　R——线圈圆角处的半径，常用 0.5 厘米。

式(5-92)所给出的估计值应与式(5-103)的计算结果相差不大，否则应该重新估计平均匝长。

6．并励(他励)绕组的重量

当用铜线绕制时，

$$G_{Cuf}=2pW_f l_{fav} A_{Cu\,f}\times 8.9\times 10^{-5} \quad (公斤) \qquad (5\text{-}104)$$

当用铝线绕制时，

$$G_{Al\,f}=2pW_f l_{fav} A_{Al\,f}\times 2.7\times 10^{-5} \quad (公斤) \qquad (5\text{-}105)$$

7．并励(他励)绕组的电阻

$$R_f=\frac{2pW_f\rho_f l_{fav}}{A_f} \quad (欧) \qquad (5\text{-}106)$$

8．并励(他励)绕组最大励磁电流

$$I_{f\,max}=\frac{U_f}{R_f} \quad (安) \qquad (5\text{-}107)$$

9．励磁余量 k_f 的核算

$$k_f=\frac{I_{f\,max}}{I_{fN}} \qquad (5\text{-}108)$$

需要指出，由于式(5-106)中的电阻 R_f 是按绝缘等级的标准温度计算的，例如对 B 级绝缘则取 75°C，而定子励磁绕组在额定负载下工作，其温度可能大于 75°C，所以按式(5-107)和(5-108)算得的 I_{max} 及 k_f 的数值可能是偏大的，也就是说，在实际负载下工作时励磁余量可能不会这样大。倘若励磁余量过大或偏小，则应重新选择导线的截面加以调整。

在绘制结构图时，励磁绕组的尺寸及平均匝长有时还要进行适当的调整，但是调整以后的 k_f 仍应在前述规定范围内。

第六章　损耗与效率

直流电机运转时，在实现机电能量转换的过程中存在或多或少的能量损耗，也即电机的输入功率不能全部转换成输出功率。这些损失的功率，或简称为损耗，将变换成热能形式使电机本身的温度升高，并散逸到周围空间。电机的输出功率和输入功率之比定义为效率。

电机在给定的功率下，损耗的大小决定了效率的高低，效率不仅反映了电机的经济指标，而且也是衡量电机质量好坏的重要技术指标之一。因为过大的损耗会使电机发热加剧，加速绝缘老化，从而影响电机的使用寿命。但是，减小损耗在一定程度上要增加电机所使用的铜、铁材料，如何适当处理两者之间的制约关系，不但在电机设计过程中要注意，并且要根据国家技术政策和使用部门的要求来综合考虑。

直流电机按损耗的性质及其产生的原因一般可以分为以下四个部分，即为电损耗、铁心损耗、机械损耗和附加损耗四种。下面分别说明并介绍各种损耗的计算方法。

6-1　电　损　耗

电损耗是指电机各个绕组的直流电阻损耗及电刷接触损耗，有时通称为铜损耗。在直流电机中，电损耗可分为两个部分：电枢电路损耗和励磁电路损耗。电枢电路损耗又包括以下几项：电枢绕组铜耗、换向极绕组铜耗、串励绕组铜耗和电刷接触损耗（对于装置补偿绕组的电机还应包括补偿绕组铜

耗)。励磁电路损耗，除了并励绕组铜耗之外，按照国家标准规定，还包括励磁电路所串联的调节电阻铜耗。

各种电损耗在电路图上的示意见图 6-1。

下面介绍各种电损耗的计算方法。

电枢绕组铜耗

$$P_{Cu\,a}=I_a^2R_a \quad (\text{瓦}) \qquad (6\text{-}1)$$

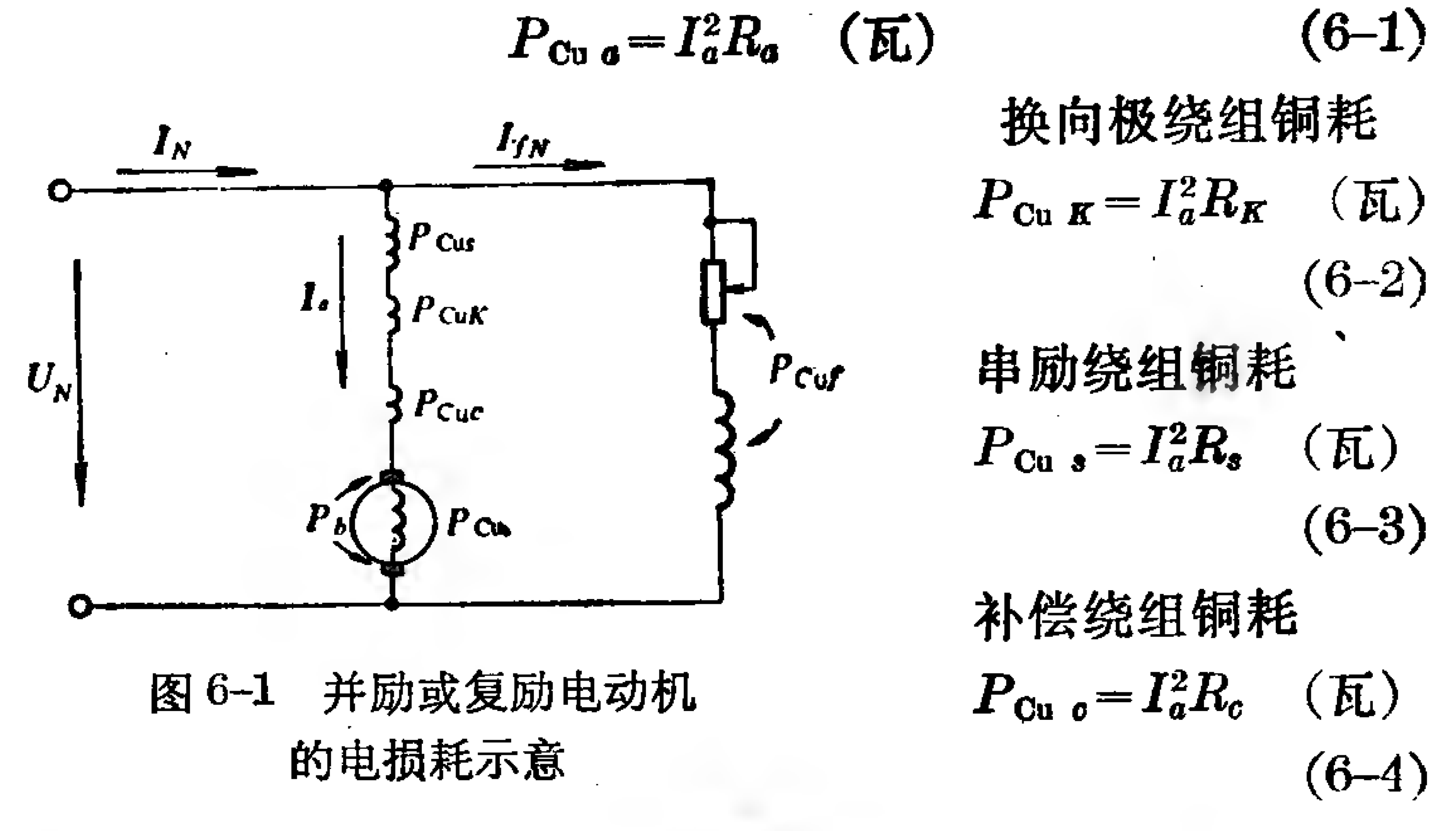


图 6-1 并励或复励电动机的电损耗示意

换向极绕组铜耗

$$P_{Cu\,K}=I_a^2R_K \quad (\text{瓦}) \qquad (6\text{-}2)$$

串励绕组铜耗

$$P_{Cu\,s}=I_a^2R_s \quad (\text{瓦}) \qquad (6\text{-}3)$$

补偿绕组铜耗

$$P_{Cu\,c}=I_a^2R_c \quad (\text{瓦}) \qquad (6\text{-}4)$$

由于绕组的直流电阻值与温度有关，为了便于比较，在计算铜耗时，绕组的电阻应换算到标准工作温度时的数值。根据 GB755-65 规定，对 A、E、B 级绝缘应换算到 75°C 时的数值，对 F、H 级绝缘应换算到 115°C 时的数值。

电刷接触损耗

$$P_b=\Delta U_bI_a \quad (\text{瓦}) \qquad (6\text{-}5)$$

式中 ΔU_b——一对电刷的接触压降。按 GB755-65 规定，对碳-石墨电刷取 $\Delta U_b=2$ 伏；对金属-石墨电刷取 $\Delta U_b=0.6$ 伏。

由于电刷与换向器的接触电阻为非线性电阻，它随着负载电流的变化而改变，因此就不宜用 $I_a^2R_b$ 公式来计算损耗。但是，电刷的接触电压降几乎不因负载电流的变化而改变，因

此采用上式计算就较方便。

励磁电路损耗

$$P_{\mathrm{Cu}\ f}=U_N I_{fN} \quad (\text{瓦}) \tag{6-6}$$

总的电损耗

$$P_{\mathrm{Cu}}=P_{\mathrm{Cu}\ a}+P_{\mathrm{Cu}\ K}+P_{\mathrm{Cu}\ s}+P_{\mathrm{Cu}\ c}+P_b+P_{\mathrm{Cu}\ f} \tag{6-7}$$

当电机某些绕组的材料用铝线来代替时，则其铜损耗应相应地改为铝损耗。最后应当指出，以上各绕组的电损耗是在直流电流波形中没有纹波时的计算值，若直流电流中含有较多的脉动分量（例如可控硅整流电源供电给电动机时），则其电损耗还必须增加由电流纹波所引起的附加损耗。对他励电机来说，在电损耗 P_{Cu} 中不计励磁损耗。

6-2 铁 心 损 耗

铁心损耗是指铁心在交变磁场的作用下所产生的磁滞损耗和涡流损耗，包括基本铁损耗和电机空载运行时的附加铁损耗。

在直流电机中，当电枢铁心旋转时，其电枢齿和电枢轭上每一点的磁通密度大小和方向都在不断变化，因此电枢铁心上存在磁滞和涡流损耗，这部分称为基本铁损耗。而在电机的机座和磁极中，虽然也流过磁通，但该磁通几乎恒定不变，故机座和磁极的铁心中就不存在基本铁心损耗。

计算铁心的基本损耗，首先应根据铁心所采用的材料，由表 6-1 找出相应的铁心损耗系数 $p_{10/50}$（即由实验测得的单位铁心重量在 $B=10000$ 高斯、$f=50$ 赫兹时的损耗值），然后求出电枢齿和电枢轭两部分的铁耗系数（即在实际磁通密度和频率下由计算得到的单位铁心重量的损耗值），最后把它乘上对应的各部分铁心重量，再考虑加工和磁通密度分布不均

表 6-1 直流电机所用硅钢片的铁耗系数 $p_{10/50}$

硅钢片型号	D_{11}	D_{12}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{24}
厚度（毫米）	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$p_{10/50}$（瓦/公斤）	3.2	2.8	2.5	2.2	2.1	2.1

匀等影响引起的损耗增大经验系数，就可得到所求的基本铁心损耗。

空载附加铁损耗包含不少项目，但主要是主极的表面损耗。在小型电机中不再另行计算，而在损耗增大系数中考虑进去。在大、中型直流电机中，主极的表面损耗较大，需单独进行计算。

一、电枢齿和电枢轭的铁耗计算

电枢齿的铁耗系数

$$p_{Fe\ ta}=p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}\left(\frac{B_{ta1/2}}{10000}\right)^{2}\quad（瓦/公斤）\qquad(6\text{-}8)$$

电枢轭的铁耗系数

$$p_{Fe\ ja}=p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}\left(\frac{B_{ja}}{10000}\right)^{2}\quad（瓦/公斤）\qquad(6\text{-}9)$$

式中 $f=\frac{pn}{60}$——铁心中交变磁化的频率（赫兹）；

$B_{ta1/2}$——电枢 $\frac{1}{2}$ 齿高处的磁通密度（麦克斯韦）；

B_{ja}——电枢轭磁通密度（麦克斯韦）；

$p_{10/50}$——是在 f 为 50 赫兹、B 为 10000 高斯条件下的铁耗系数（瓦/公斤），直流电机铁心常用的各种硅钢片材料的 $p_{10/50}$ 见表 6-1。

电枢齿重

$$G_{Fe\ ta}=\gamma_{Fe}zb_{ta1/2}L_{ta}l_{Fe}k_{Fe\ a}\quad（公斤）\qquad(6\text{-}10)$$

式中 γ_{Fe}——铁的比重，等于 7.8×10^{-3}（公斤/厘米^3）；

z——电枢齿数；

$b_{ta1/2}$——在电枢 $\frac{1}{2}$ 齿高处的齿宽（厘米）；

L_{ta}——电枢齿的磁路计算长度（厘米）；

l_{Fe}——电枢铁心的净长（厘米）；

$k_{Fe\,a}$——电枢铁心压装系数。

电枢轭重

在无轴向通风孔的情况下

$$G_{Fe j\,a}=\gamma_{Fe}\,\pi(D_a-2L_{ta}-h_{ja})l_{Fe}h_{ja}k_{Fe\,a}\quad(\text{公斤})\qquad(6\text{–}11)$$

在有轴向通风孔的情况下

$$G_{Fe\,ja}=\gamma_{Fe}\frac{\pi}{4}[(D_a-2L_{ta})^2-D_{ia}^2-N_v d_v^2]l_{Fe}k_{Fe\,a}\quad(\text{公斤})\qquad(6\text{–}12)$$

式中 h_{ja}——电枢轭高度（厘米）；

N_v——轴向通风孔个数；

d_v——轴向通风孔直径（厘米），当通风孔为半圆形时，$N_v d_v^2$ 项应改为 $\frac{1}{2}N_v d_v^2$；

D_{ia}——电枢内径（厘米）。

电枢齿铁耗

$$P_{Fe\,ta}=k_{ta}p_{Fe\,ta}G_{Fe\,ta}\quad(\text{瓦})\qquad(6\text{–}13)$$

电枢轭铁耗

$$P_{Fe\,ja}=k_{ja}p_{Fe\,ja}G_{Fe\,ja}\quad(\text{瓦})\qquad(6\text{–}14)$$

以上两式中 k_{ta} 和 k_{ja} 分别为齿、轭铁耗的增大系数。这是考虑到由于电枢钢片的冲剪加工以及磁通分布不均匀等影响所引起的铁耗增大，在小型电机中这个系数还包括因各种原因所引起的空载附加铁耗的影响。

二、空载附加损耗

空载的附加损耗有下面一些项目。

1. 脉振附加损耗

前已述及，机座轭和主磁极里的磁通可看作几乎不变，但还不是恒定的。这是因为电枢有齿槽，主磁极表面有时也有补偿齿槽，当电枢旋转时，齿槽的相对位置在不断地改变，从而可能使主磁通的整个磁路的磁导也随之而变化。如果主磁通磁路的磁导因电机旋转而变化，则主磁通就产生脉振。如图 6-2，这是磁通脉振的示意图，其中 a) 对应于磁导最大的情况，b) 对应于磁导最小的情况。由磁通脉振所产生的铁损耗称为脉振附加损耗。

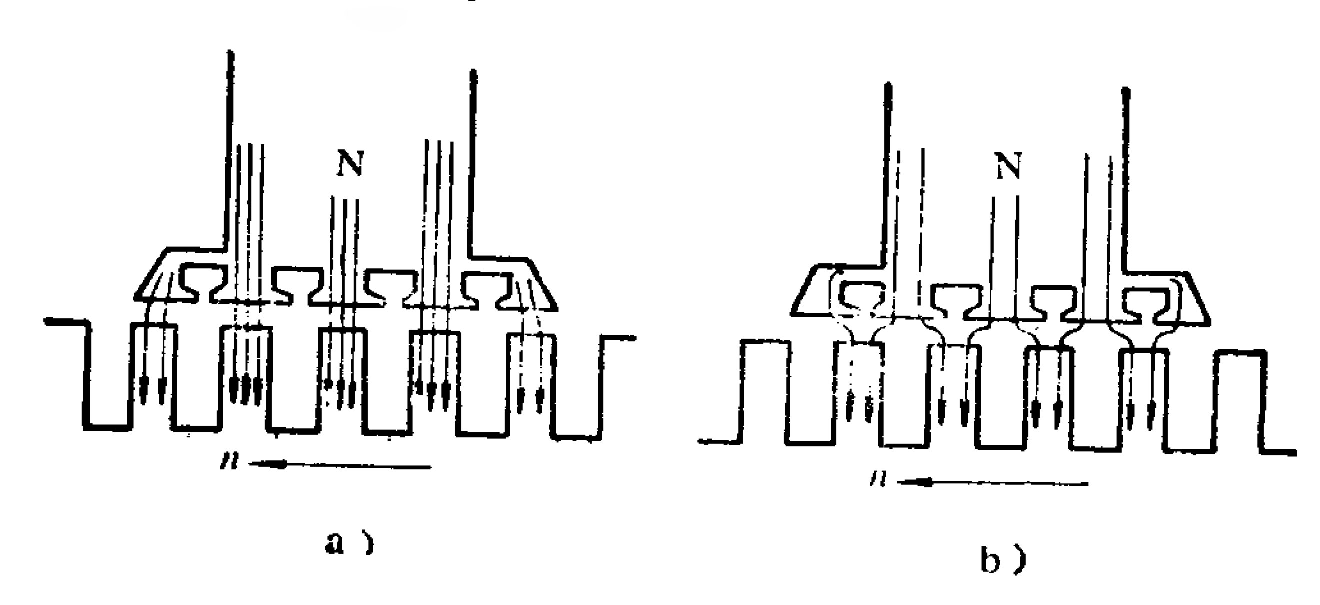


图 6-2　磁通脉动示意
a）磁导最大的情况　b）磁导最小的情况

2. 表面附加损耗

由于电枢存在齿、槽，气隙磁场的波形将如图 6-3 中的曲线 1 所示，从而使极靴表面上的磁密分布不均匀。当电枢转动时，气隙中如波浪起伏的磁场相对于磁极表面将作横向移动，由于磁场的横向移动，使极靴表面上每一点磁场的大小也随时间而改变，从而在极靴表面产生铁耗，这类铁耗通常称为表面损耗。

表面铁耗只限于在极靴表面存在。这是因为当不均匀分布的磁场一旦进入到磁极铁芯内部时，立即趋于均匀，从而在这铁芯中不再存在不均匀的横向移动磁场和由此而产生的附加损耗。

表面铁耗与气隙长度以及槽口宽度有关，气隙越小，槽口越宽，则表面铁耗越大。具体计算公式见式(6–16)。

3．磁场非正弦分布时的附加损耗

直流电机的气隙磁场波形如图 6–3 中曲线 1 所示，如果不考虑电枢齿槽的影响，则气隙磁场波形为平顶波，如图 6–3 中曲线 2 所示。这样，当电枢旋转时，电枢铁芯中各部分的磁通密度随时间的变化将不是正弦规律，由此所产生的损耗必然大于磁场按正弦变化所造成的损耗，其增加的部分称之为磁场非正弦分布的附加损耗。

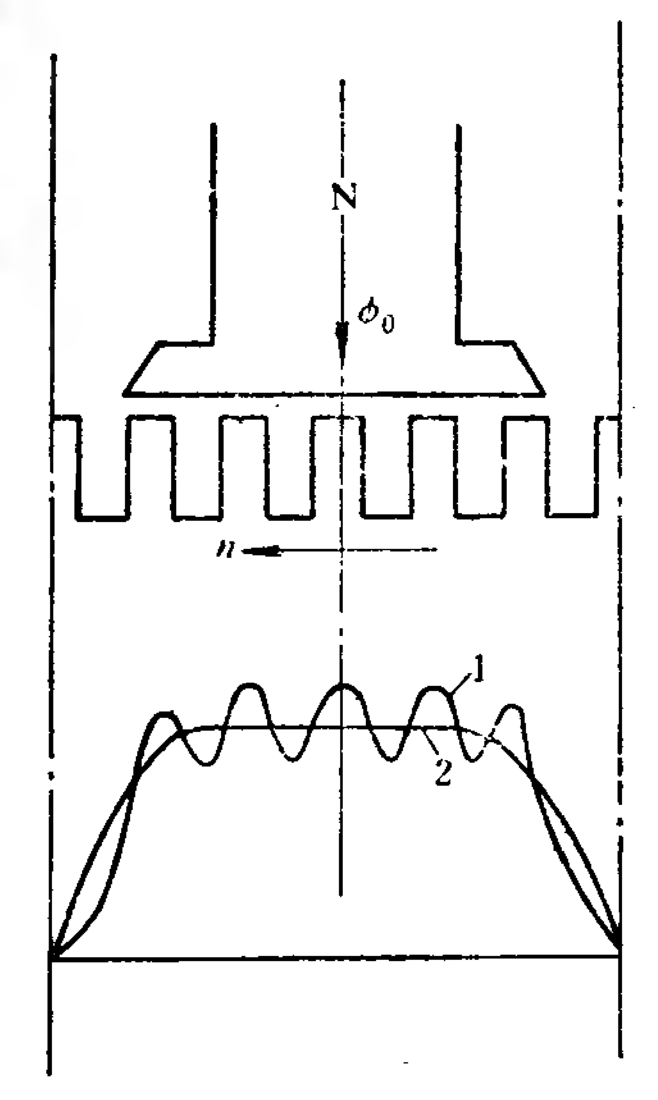


图 6–3　磁场横向移动

1—空载磁场曲线

2—空载平均磁场曲线

4．冲剪加工损耗

硅钢片在冲剪之后，其边缘处会产生冷硬化，在叠压之后，片间会有毛刷短接，这些都会引起铁耗的增大。如果叠压的铁心再进行车削或锉磨，其损耗的增加就更为严重。

5．旋转损耗

电枢的结构部件在磁场内旋转也会产生附加铁损耗。例如电枢铁心的拉紧螺杆、电枢支架、端部压圈等，均系整块铁

心，它们在磁场内旋转时会产生较大的涡流，从而引起涡流损耗。再如电枢的钢丝扎带也会因电枢旋转而产生涡流损耗。

以上这些附加损耗都是由于主磁通的存在而引起的，但不一定都发生在电枢的铁心内。在电机空载试验时，它们和电枢的基本铁损耗同时存在，并且无法分开，因此就作为电枢基本铁耗的附加铁耗，并把它归入铁心损耗之内。

三、主磁极表面损耗的计算

前面已经提及主磁极表面损耗产生的原因，由于在大、中型直流电机中采用了开口槽，所以表面损耗比较显著。表面损耗可按以下公式进行计算

脉振磁密 B_0（见图 6-4）为

$$B_0=\beta_0 k_\delta B_\delta \quad (\text{高斯}) \tag{6-15}$$

式中　β_0——脉振系数，可从图 6-5 查得。

叠片主磁极的表面损耗

$$P_{\text{Fe}\,p}=K_0\left(\frac{Zn_N}{10000}\right)^{1.5}\left(\frac{B_0 t_a}{1000}\right)^2 A_p 10^{-4} \quad (\text{瓦}) \tag{6-16}$$

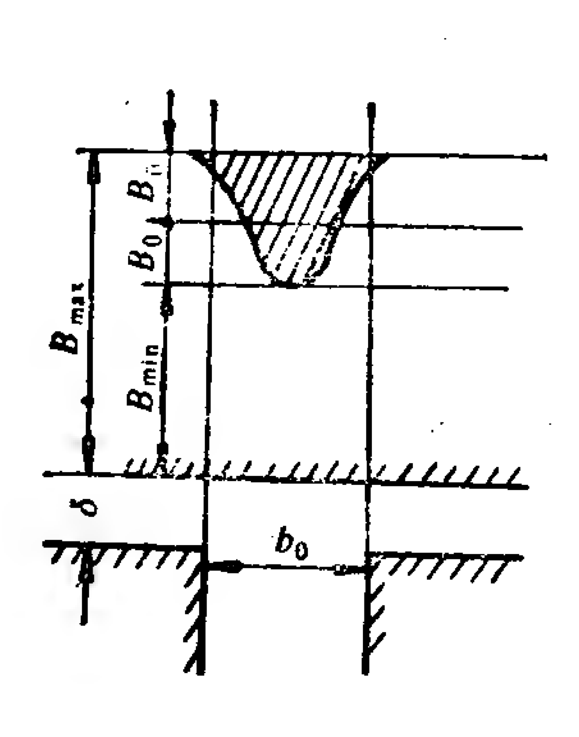


图 6-4　脉振磁密

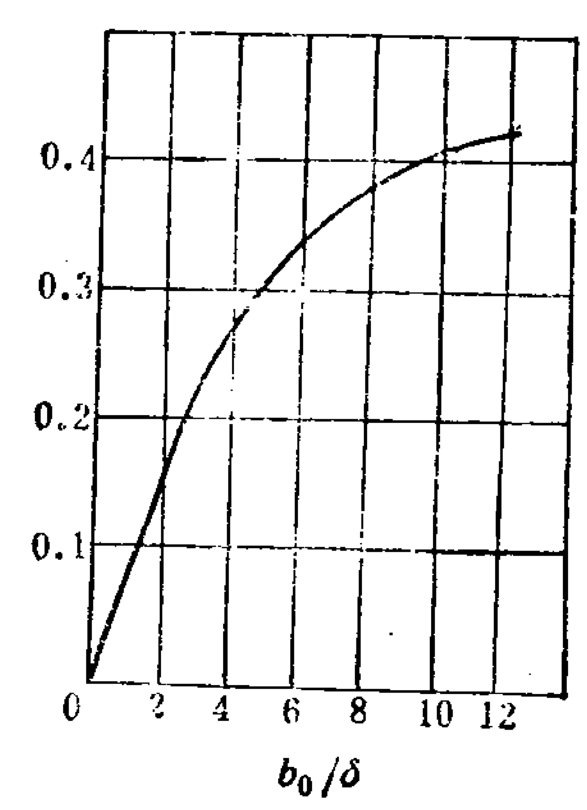


图 6-5　脉振系数

式中 K_0——系数。磁极材料为1毫米厚的钢板时，K_0 取 2.8；磁极材料为1.5毫米厚的钢板时，K_0 取 4；

Z——电枢槽数；

t_a——电枢齿顶处齿距(厘米)；

n_N——电枢额定转速(转/分)；

A_p——极靴表面总面积(厘米²)；

B_0——气隙中的脉振磁密(高斯)。

而 $$A_p = 2pb_pl_mk_{Fe\ m} \quad (\text{厘米}^2)$$

式中 b_p——主磁极极弧长度(厘米)；

l_m——主磁极轴向长度(厘米)；

$k_{Fe\ m}$——主磁极铁心压装系数，采用1～1.5mm厚钢板时，$k_{Fe\ m}$ 为0.94。

四、总的铁心损耗

按生产实践经验，对于小型直流电机来说，其总的铁心损耗为

$$P_{Fe} = P_{Fe\ ta} + P_{Fe\ ja} = k_{ta}p_{Fe\ ta}G_{Fe\ ta} + k_{ja}p_{Fe\ ja}G_{Fe\ ja} \quad (6\text{–}17)$$

其中铁耗的增大系数可取下列数值

开 口 槽(矩形槽) $k_{ta}=3.6$ $k_{ja}=2.8$

半闭口槽(梨形槽) $k_{ta}=2.8$ $k_{ja}=2.1$

对于大、中型直流电机，其总的铁心损耗可按以下三部分进行计算

$$\begin{aligned} P_{Fe} &= P_{Fe\ ta} + P_{Fe\ ja} + P_{Fe\ p} \\ &= k_{ta}p_{Fe\ ta}G_{Fe\ ta} + k_{ja}p_{Fe\ ja}G_{Fe\ ja} + P_{Fe\ p} \quad (6\text{–}18) \end{aligned}$$

其中铁耗的增大系数可在下列范围内选取

$$k_{ta}=1.7\sim2,\ k_{ja}=1.3\sim1.5。$$

6-3 机械损耗

直流电机的机械损耗主要有三项,即轴承摩擦损耗、通风摩擦损耗和电刷摩擦损耗。分别说明如下。

一、轴承摩擦损耗和通风摩擦损耗

1. 轴承摩擦损耗

直流电机的轴承可分滚动轴承和滑动轴承两大类, 滚动轴承常用在中小型电机中,而滑动轴承用于大型电机中。

为了看出轴承的摩擦损耗与哪些因素有关, 以滚动轴承摩擦损耗的计算公式为例来加以说明。滚动轴承摩擦损耗

$$P_{fbr}=9.81k_{fbr}\frac{F_{br}}{d_{br}}v_{br} \quad (瓦) \qquad (6\text{-}19)$$

式中 k_{fbr}——摩擦系数, 对滚珠轴承 $k_{fbr}=0.001\sim0.002$, 对滚柱轴承 $k_{fbr}=0.002\sim0.003$;

F_{br}——轴承上的总压力(公斤);

d_{br}——滚珠或滚柱中心所构成的圆周直径(厘米);

v_{br}——滚珠或滚柱中心的圆周速度(米/秒)。

由于 v_{br} 正比于电机的转速 n, 因此由上式可见, 轴承摩擦损耗 P_{fbr} 正比于轴承承受的压力、摩擦系数和电机的转速。

在实际计算中, 轴承的摩擦损耗和通风的摩擦损耗合并在一起考虑。

2. 通风摩擦损耗

电机常用的通风方式有自通风和外通风两种。自通风是在电机的轴上安装风扇, 依靠电机旋转带动风扇叶片使空气流动, 以散发电机中的热量。外通风是利用电机外部的鼓风机迫使空气在电机内部流动, 把热量带走。为了看出通风摩

擦与哪些因素有关，以自通风摩擦损耗 P_{fv} 的计算公式为例来加以说明。自通风摩擦损耗

$$P_{fv}=1.75Q_Av^2 \quad (瓦) \tag{6-20}$$

式中 Q_A——通过电机的空气量(米^3/秒)；

v——风扇的外径圆周速度(米/秒)。

由于 Q_A 和 v 成正比，因此 P_{fv} 正比于 v^3，亦即正比于电机转速的三次方。

3．摩擦损耗的经验计算方法

电机的轴承摩擦损耗和通风摩擦损耗虽然可用公式进行计算，但计算出来的数据往往和实测结果相差甚大，因此工厂中通常用经验曲线来求取这两项损耗之和。图 6-6 和图 6-7 分别为中小型直流电机(滚动)轴承、通风摩擦损耗和大中型直流电机(滑动)轴承、通风摩擦损耗的经验曲线。根据电机的直径 D_a 和转速 n，或者根据电枢的线速度 v_a，可以查得相应的摩擦损耗。

二、电刷摩擦损耗

电刷的摩擦损耗与电刷的摩擦系数、弹簧压力、电刷接触换向器的总面积以及换向器的周速等因素有关，按照目前通常采用的电刷、刷握弹簧结构，电刷摩擦损耗可按下式计算

$$P_{fb}=9.81k_{fb}F_bA_bv_K \quad (瓦) \tag{6-21}$$

式中 k_{fb}——电刷对换向器表面的摩擦系数，一般为 0.2～0.3；

F_b——电刷的单位面积压力，一般为 0.15～0.25 公斤/厘米^2；

A_b——电刷和换向器的接触总面积(厘米^2)；

v_K——换向器圆周速度(米/秒)。

由上式可见，P_{fb} 正比于 v_K，而 v_K 正比于转速，故 P_{fb} 正

6000
5000
4000
3000
2000
1000
600
500
400
300
200
100
60
50
40
30
20

1500转/分
1000
750
600
500
3000转/分
自扇冷
500转/分
400
320
外通风

$P_{fbr}+P_{fv}$ (瓦)

100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650

D_a(毫米)

图 6-6 中小型直流电机(滚动)轴承和通风摩擦损耗

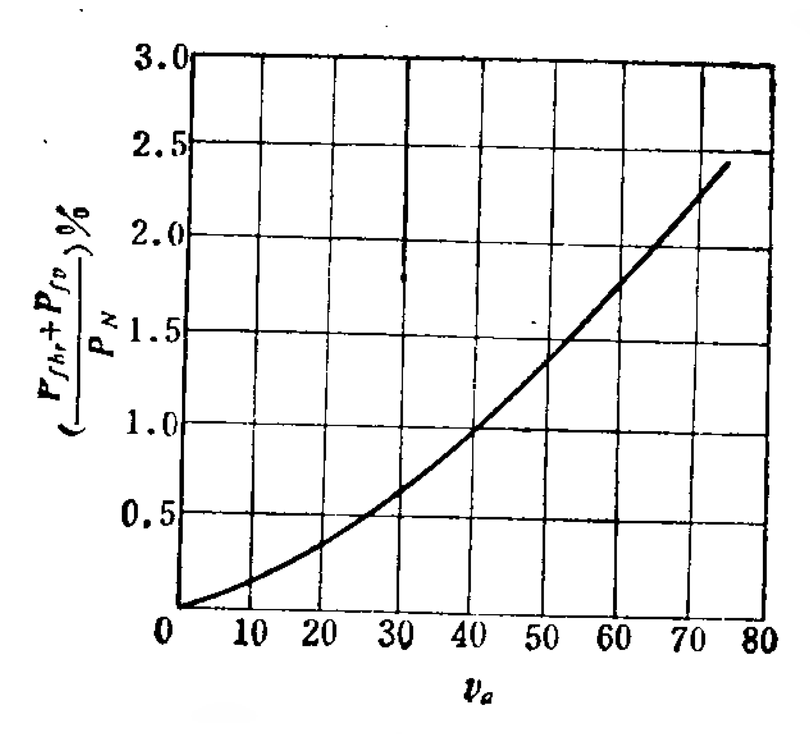


图 6-7 大中型直流电机(滑动)
轴承和通风摩擦损耗

比于电机的转速n。

三、总的机械损耗

总的机械损耗为

$$P_{fw}=P_{fbr}+P_{fv}+P_{fb} \quad (\text{瓦}) \tag{6-22}$$

6-4 附加损耗

上面所提到的三项损耗——电损耗、铁心损耗和机械损耗，是电机总损耗中的主要部分，其中的铁心损耗还包括空载时的附加损耗。但是，电机在负载运行时，除了上述这些主要损耗外，在铁心和导体内还存在着一些数量较小的损耗，称为负载时附加损耗P_{ad}，有时也称杂散损耗。

负载时的附加损耗大致有以下几个方面的原因所造成的：

(1) 电机负载运行时，由于电枢反应作用，气隙磁场发生畸变，这时，电枢铁心内磁通密度的最大值将比空载运行时增大，故电枢铁耗也比空载时增加。如果在电机的主磁极上装有补偿绕组，则气隙磁场不再畸变，这种电枢铁耗的增加可以基本上被消除。

(2) 由于电枢中换向元件的电流是交变的，从而换向元件的导体处在交变漏磁场中，形成导体内电流分布不均匀现象，这种现象通常称之为趋肤效应。因趋肤效应所造成的交流电阻大于直流电阻，从而产生了附加铜耗。在中大型电机中，因电枢槽较深，趋肤效应比较显著，因此要尽量减小导体的高度。换向电流的交变磁场也还会在附近的金属部件中产生涡流和磁滞损耗。

(3) 由于电流在电刷表面分布不均匀，从而引起电刷接触损耗的增加。

(4) 电枢绕组均压线内的均压电流引起附加铜耗。

直流电机附加损耗的计算比较困难，测试也不容易，所以在设计和试验时都根据国家标准进行计算。GB755-65 规定：附加损耗为发电机的输出功率或电动机的输入功率（即 $U_N I_N$）的 1%（无补偿绕组）或 0.5%（有补偿绕组）。

6-5 总损耗与效率

电机中各项损耗之总和即为总损耗

$$\Sigma P = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{fw} + P_{ad} \tag{6-23}$$

如果用 P_1 表示输入功率，P_2 表示输出功率，那末

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \tag{6-24}$$

效率 η 为输出功率和输入功率之比，一般用百分值表示

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \tag{6-25}$$

为了便于计算，对于电动机，上式可化为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \times 100\%$$
$$= \frac{U_N I_N - \Sigma P}{U_N I_N} \times 100\% \tag{6-26}$$

对于发电机，则可化为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \times 100\%$$
$$= \frac{U_N I_N}{U_N I_N + \Sigma P} \times 100\% \tag{6-27}$$

我国生产的主要电机系列，其效率一般均在技术标准中规定。一般说来，随着容量的增大，其效率的规定值也相应提高。

第七章　运行特性计算

直流电动机的运行特性通常是指转速特性、转矩特性、机械特性和效率特性；直流发电机的运行特性通常是指空载特性、负载特性、外特性、调整特性和效率特性。它们是判断电机能否正常工作和是否满足生产要求的重要标志。以上各种曲线不仅可以从试验中求取，还可以通过计算得到。但是在电机设计中一般并不要求把所有的工作特性曲线都计算出来，而只要求计算额定负载时的效率和转速变化率（对电动机而言）或电压变化率（对发电机而言），以校核所设计的电机是否符合给定的技术要求。效率的计算已在第六章中专门讨论。根据实际需要出发，本章将着重讨论转速变化率和电压变化率的计算，同时也说明电动机的各种特性曲线的计算方法。

此外，直流电动机的电枢电感值，因与运行有关，亦并入这一章内讨论。

7-1　电动机的运行特性及转速变化率

当电动机的端电压 $U=U_N=$ 常值、电枢电路不串入外加电阻、并励励磁电流保持额定值不变时，转速 n 与输出功率 P_2 之间的关系曲线称为转速特性，电磁转矩 T 与 P_2 之间的关系曲线称为转矩特性，效率 η 与 P_2 之间的关系曲线称为效率曲线，转速 n 和电磁转矩 T 之间的关系曲线称为机械特性。它们相应地表示为

$$n=f(P_2),\ T=f(P_2),\ \eta=f(P_2)\quad 和\quad n=f(T)。$$

由于在实际运行时，I_a 较易测得，且 I_a 随着 P_2 的增加而增加，故前面三条特性也可表示为

$$n=f(I_a),\ T=f(I_a) \quad 和 \quad \eta=f(I_a)。$$

一、转速特性曲线和转速变化率

并励或复励电动机的转速特性一般是转速随着电枢电流的增加而略有下降，如图 7-1 中的曲线 1 所示，其下降的程度随不同的励磁方式而异。但是，假使并励电动机的电枢反应去磁作用较为强烈，其转速特性有时会稍为上翘，如同差复励电动机的转速特性，如图中曲线 2 所示。上翘的转速特性会引起电动机的不稳定运行。如果在并励电动机的主磁极上安装起助磁作用的串励绕组（有时称串励稳定绕组），用以抵偿电枢反应的去磁作用，则转速特性又可呈下垂的形状，保证了电机的稳定运行。带有串励稳定绕组的并励电动机在励磁方式上就是复励电动机。

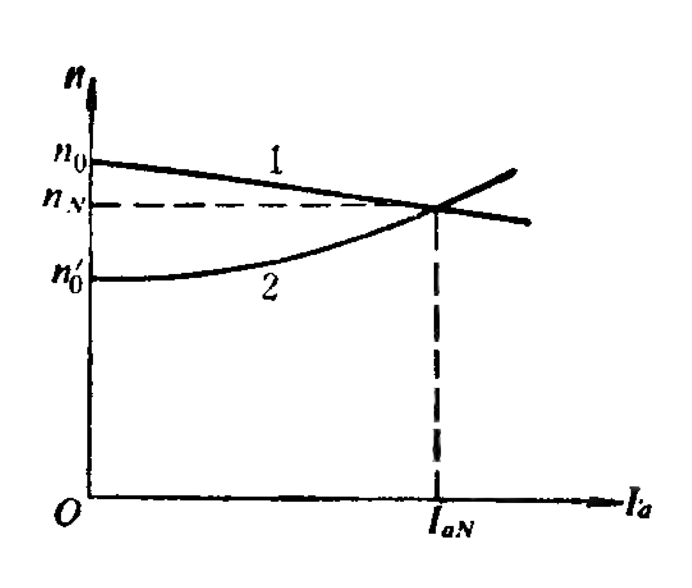


图 7-1 并励或复励电动机的转速特性曲线示意

并励或复励电动机的转速变化率（也称转速调整率）是：在端电压为额定值，电枢电路不串入外加电阻、并励励磁电流保持在额定值不变时，电动机从额定负载过渡到空载，其转速升高的数值对额定转速的百分比，即

$$\Delta n=\frac{n_0-n_N}{n_N}\times 100\% \tag{7-1}$$

式中 n_N——额定转速（转/分）；

n_0——空载转速（转/分）。

显然，对图 7-1 中的曲线 2，其转速变化率为负值，一般是

不允许的；对曲线1，其转速变化率为正值，其数值应符合技术要求的规定(见第一章)。

电动机的空载转速可按以下步骤求出。

根据式(2-7)，有

$$E=\frac{pN_a}{60a}\Phi n\times10^{-8}\quad(伏)$$

在空载时就有

$$n_0=\frac{60a}{pN_a}\frac{E_0}{\Phi_0}\times10^8\quad(转/分)\tag{7-2}$$

式中 E_0——空载电动势(伏)；

Φ_0——空载每极主磁通(麦克斯韦)；

p——极对数；

N_a——电枢总导体数；

a——电枢的并联支路对数。

式(7-2)中的空载电动势 E_0 严格地说应按下式进行计算。

$$E_0=U_N-I_{a0}(R_a+R_c+R_s)-\Delta U_{b0}\tag{7-3}$$

而

$$I_{a0}=\frac{P_0}{U_N}=\frac{P_{\mathrm{Fe}}+P_{fw}}{U_N}\tag{7-4}$$

实际上，由于空载电枢电流 I_{a0} 很小，空载时的电刷压降 ΔU_{b0} 也很小，故可近似地认为 $E_0=U_N$。

式(7-2)中的空载磁通 Φ_0 与满载磁通 Φ_N 有区别。这是因为空载时串励绕组的磁动势和交轴电枢反应的去磁磁动势几乎都等于零，空载磁动势 F_0 几乎等于额定并励励磁电流所产生的并励磁动势 F_f(而额定负载的磁动势 $F_N=F_f+F_s-F_{aqd}$)。空载磁通 Φ_0 可以由 F_0 直接从磁化曲线上查得。

由 Φ_0 和 E_0 的数值从式(7-2)可以算出 n_0，再根据 n_0 和给定的额定转速 n_N 从式(7-1)得到转速变化率。

如果给出的不是 $\Phi=f(F)$（即磁化曲线），而是额定转速下的 $E=f(I_f)$ 曲线（即空载特性曲线），则由于

$$\Phi_0=\frac{60a}{pN_a}\frac{E_0'}{n_N}\times 10^8 \quad (\text{麦})$$

代入式(7-2)，可得

$$n_0=n_N\frac{E_0}{E_0'} \quad (\text{转/分}) \tag{7-5}$$

其中，E_0' 为当转速为 n_N 时对应于额定并励电流 i_{fN} 的感应电动势，可由电动机 $n=n_N$ 的空载特性曲线查得，从而可计算其转速变化率。

二、特性曲线的计算

特性曲线的计算就是要在不同的负载电流下，求取相应的转速、电磁转矩、输出功率和效率。

电动机特性计算可按下面的步骤进行。

(1) 确定在不同电枢电流 I_a 时的电枢电动势

$$E_a=U_N-I_a(R_a+R_c+R_s)-\Delta U_b \quad (\text{伏}) \tag{7-6}$$

(2) 求取电枢反应去磁磁动势折算到并励绕组的励磁电流 I_f''

$$I_f''=\frac{F_{aq\,dN}}{W_f}\frac{I_a}{I_{aN}} \quad (\text{安}) \tag{7-7}$$

上式假定电枢反应去磁磁动势正比于电枢电流，这是近似的。

(3) 计算有效励磁电流 I_f'

$$I_f'=I_{fN}-I_f''+\frac{I_aW_s}{W_f} \quad (\text{安}) \tag{7-8}$$

其中，I_{fN} 是根据第五章磁路计算中所得到的额定并励电流，也就是令 $E=U_N$ 在转速为 n_N 的空载特性曲线上所对应的励磁电流。

对于串励电动机

$$I'_f = I_a - \frac{F_{aq\,dN}}{W_s}\frac{I_a}{I_{aN}} \quad (安) \tag{7-9}$$

(4) 找出等值的电枢电动势 E'_a

由式(7-8)或(7-9)所求得的各个有效励磁电流 I'_f 值，在转速为 n_N 时的空载特性曲线上找出其对应的电枢电动势 E'_a。

(5) 计算转速 n

$$n = \frac{E_a}{E'_a} n_N \quad (转/分) \tag{7-10}$$

(6) 计算输入功率 P_1

对于并励或复励:

$$P_1 = U_N(I_a + I_{fN}) \quad (瓦) \tag{7-11}$$

对于他励:

$$P_1 = U_N I_a + U_f I_{fN} \quad (瓦) \tag{7-12}$$

对于串励:

$$P_1 = U_N I_a \quad (瓦) \tag{7-13}$$

(7) 计算输出功率 P_2

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \quad (瓦) \tag{7-14}$$

式中 ΣP——电动机的总损耗，其中电枢电路的电损耗和附加损耗按不同的电枢电流计算，而励磁电路的电损耗、铁心损耗与机械损耗假定不随负载而变化。

(8) 计算输出转矩 T_2

$$T_2 = 0.975\frac{P_2}{n} \quad (公斤·米) \tag{7-15}$$

(9) 计算电磁转矩 T

空载转矩为

$$T_0 = 0.975\frac{P_0}{n} \quad (公斤·米) \tag{7-16}$$

电磁转矩为

$$T = T_2 + T_0 \quad (\text{公斤·米}) \tag{7-17}$$

(10) 计算效率 η:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \tag{7-18}$$

通过上述各项的数值计算，就可以求得在不同负载时的转速 n、电磁转矩 T、输出功率 P_2 和效率 η 等，从而就可以绘制电动机的特性曲线，即 n、T、$\eta = f(P_2)$ 和 $n = f(T)$，如图 7-2 和图 7-3 所示。

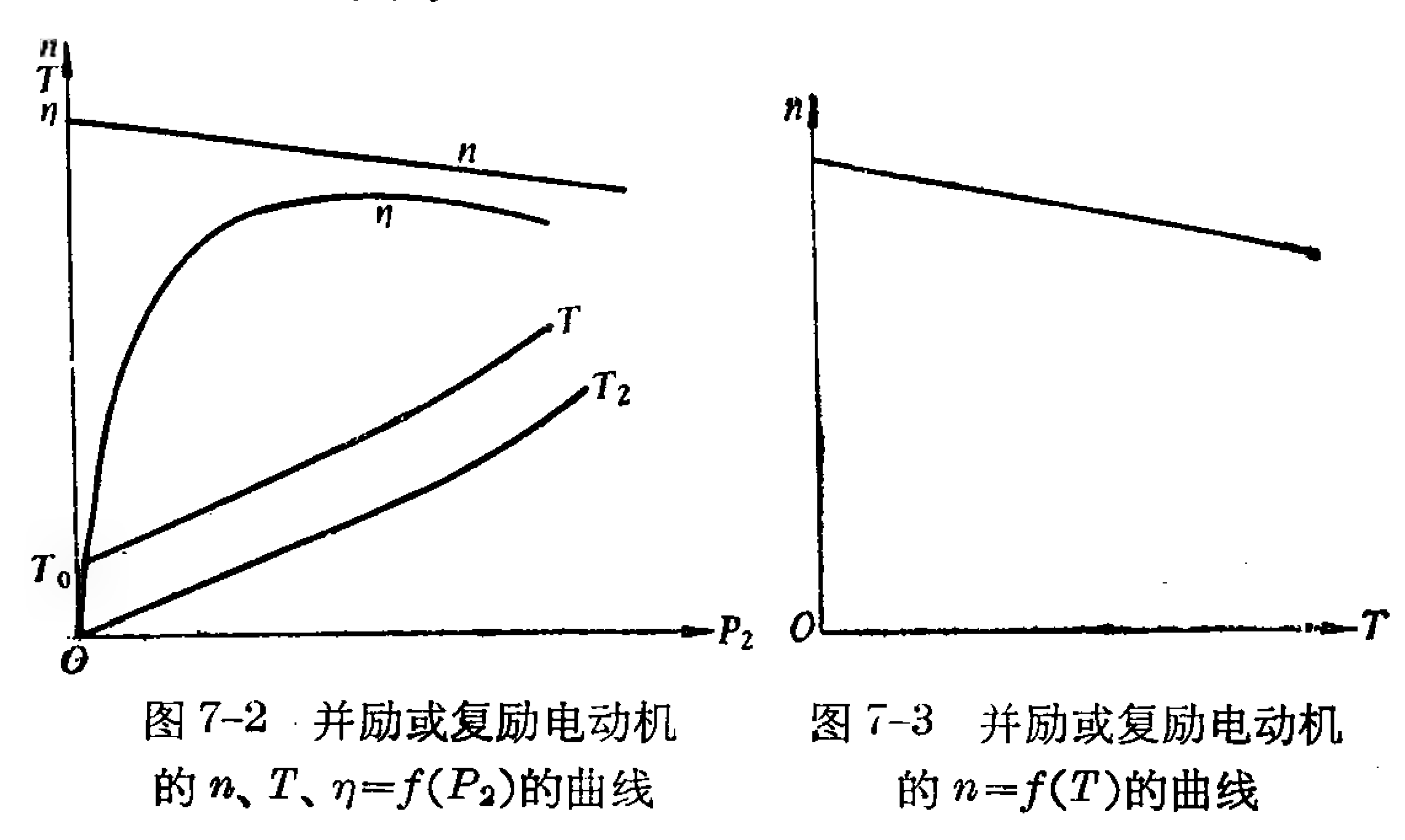


图 7-2 并励或复励电动机的 n、T、$\eta = f(P_2)$的曲线

图 7-3 并励或复励电动机的 $n = f(T)$的曲线

7-2 发电机的运行特性及电压变化率

当 n = 常值、$I = 0$ 时，$U_0 = f(I_f)$ 的关系曲线称为空载特性。当 n = 常值、I = 常值时，$U = f(I_f)$ 的关系曲线称为负载特性。当 n = 常值、I_f = 常值时，$U = f(I)$ 的关系曲线称为外特性。当 n = 常值、U = 常值时，$I_f = f(I)$ 的关系曲线称为调整特性。当 n = 常值时，$\eta = f(P_2)$ 的关系曲线称为效率特性。

空载特性在第五章中已经说明。效率特性的计算见式

(6-27)。负载特性和调整特性在设计中一般不要求计算，因此这里只需对外特性加以说明，从而研究电压变化率的计算。

并励发电机外特性曲线的形状是电压随着电流的增长而略有下降，如图7-4中的曲线1所示。如果电枢反应的去磁作用越强烈，则外特性曲线下降越显著，这样有时就不能满足使用要求。对于积复励发电机，串励绕组的助磁作用就可以在不同程度上抵消电枢反应的去磁作用和电枢压降，使满载电压略低于空载电压，或者使满载电压等于空载电压(如图中曲线2所示)，甚至使满载电压大于空载电压(如图中曲线3所示)，故其外特性曲线的形状有可能随电流的增长而略有上升。

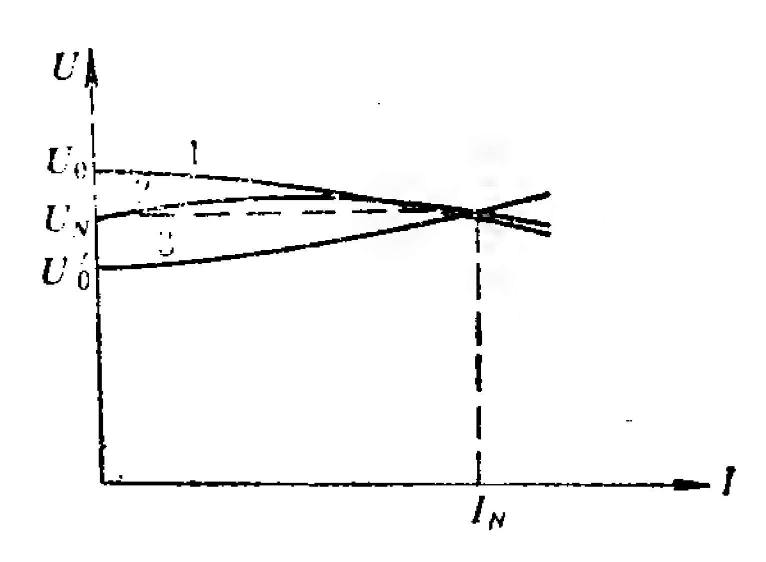


图7-4 并励或复励发电机的外特性曲线示意

并励或复励发电机的电压变化率(也称电压调整率)是：当转速为额定值、并励绕组的电阻R_f不变时，发电机从额定负载($U=U_N$, $I=I_N$)过渡到空载($U=U_0$, $I=0$)，电压升高的数值对额定电压的百分比，即

$$\Delta U=\frac{U_0-U_N}{U_N}\times 100\% \tag{7-19}$$

从图7-4可以明显地看出：对于曲线1，电压变化率为正值；对于曲线2，电压变化率为零；对于曲线3，电压变化率为负值。电压变化率的允许值应符合技术要求的规定(见第一章)。

并励或复励发电机空载电压U_0求取的方法如下。

从磁路计算中所得到的发电机的磁化曲线 $\Phi=f(F_f)$，可以转换成在额定转速下的空载特性曲线 $E_0=f(I_f)$，因为可以根据

$$E_0=\frac{pN_a}{60a}\Phi_0 n_N\times 10^{-8}$$

和

$$I_f=\frac{F_f}{W_f}$$

来确定 E_0 与 Φ_0 间、I_f 与 F_f 间的转换关系。在空载时，电枢电动势和端电压是非常接近的，即 $E_0\approx U_0$，因此可以把空载特性曲线的纵坐标 E_0 改成 U_0，见图 7-5。

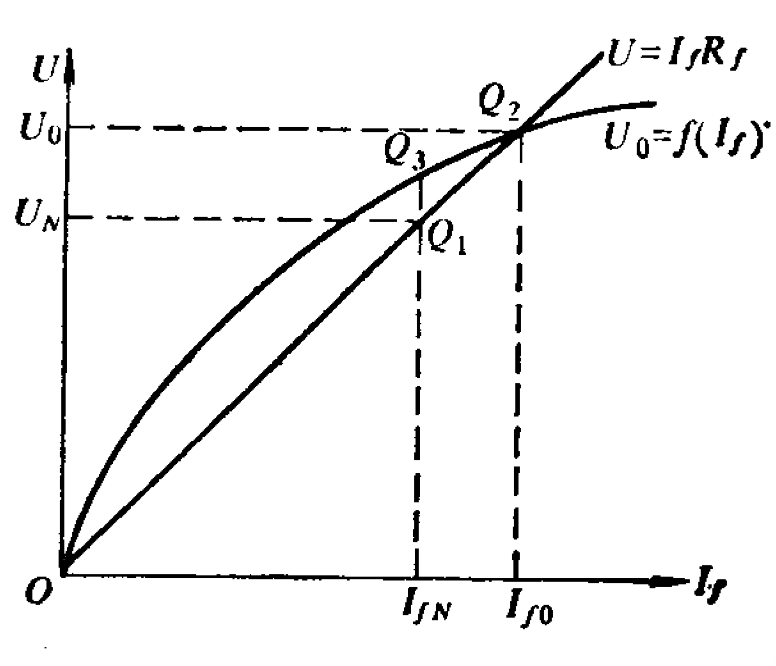


图 7-5 并励或复励发电机空载电压 U_0 的求取

对于并励绕组，根据欧姆定律，有

$$U_f=U=I_fR_f \quad (7\text{-}20)$$

这就是说，发电机输出电压 U 与并励绕组电流 I_f 的关系是一条直线，亦见图 7-5。

电机在额定负载运行时，其并励绕组的电流为 I_{fN}，工作在 Q_1 点上，Q_1 的纵坐标为额定电压 U_N。它与 Q_3 点所对应的空载电压有差别，这是由于电枢反应去磁磁动势和串励绕组磁动势的作用以及电枢压降所造成的。当卸去负载后，电机便进入并励发电机的自励建压过程，而最终工作在 Q_2 点上，Q_2 点的纵坐标就是空载电压 U_0。顺便指出，对积复励发电机来说，Q_1 点也可能位于 Q_2 点的右侧。

根据求得的 U_0 和给定的 U_N，代入式(7-19)中即可算出发电机的电压变化率。

7-3 电枢电路电感的计算

直流电动机用可控硅整流电源供电已日益广泛，这是因为这种供电及控制系统可使电动机动作速度快、调速范围宽和控制精度高，从而提高了自动化程度。但是，可控硅整流电源也给电动机带来了不利影响，如使电机换向恶化、温升升高、振动噪声增大等。这些不良后果的根本原因在于整流电源的输出电流中存在谐波分量。当然，采取一些措施后，困难是可以克服的。

在可控硅整流电源的输出电压中，谐波分量的大小将随整流电路的相数和控制角的大小而变化，而输出电流中谐波分量的大小，除了直接与谐波电压有关外，还决定于整流电路的电感和电动机电枢电路的电感。增大电感量可以抑制谐波电流，从而改善电动机运行的不良状态。为了保证电动机的正常运行，在给定的整流线路的情况下，就需要根据电机的电枢电感值来确定是否还要联接外接电抗器，或者所联电抗器的大小。因此，电枢电感值在设计可控硅整流电源供电的系统中是需要预先给定的。

此外，当研究直流电动机的瞬变过程时，电枢电感是动态方程组中的一个重要参数，也需要预先给定。

电枢电感可以用试验来求取，也可以根据 $L=\frac{\psi}{i}$ 进行计算。在电枢电路中，存在电枢绕组、换向极绕组、串励绕组和补偿绕组，根据各个绕组的磁路情况以及绕组间的耦合关系，可以算出它们的自感和互感，再按照各个绕组互感磁通的增助和消减情况，算出总的电感。这样计算虽然比较冗长、繁琐，但并不困难。计算电感的困难在于如何计及涡流效应和

饱和影响。一般来说，涡流效应对电感的影响不大，尤其是对于叠片结构的磁路。磁路的饱和使磁链和电流不成正比关系，因此所求得的电感随电枢电流而变化，而磁路的饱和状态不但因磁路的结构而异，而且也随主磁极上并励绕组的励磁情况而变。因此，电感饱和值的计算难以准确地用解析式来表达。

现在，一般采用下面的经验公式来计算电枢电感不饱和值

$$L_a = 19.1 \frac{U_N}{2pI_N n_N} C_a \quad (\text{亨}) \tag{7-21}$$

饱和值

$$L_a = 19.1 \frac{U_N}{2pI_N n_N} C_a k_\mu \quad (\text{亨}) \tag{7-22}$$

式中 U_N——额定电压（伏）；

I_N——额定电流（安）；

n_N——额定转速（转/分）；

p——极对数；

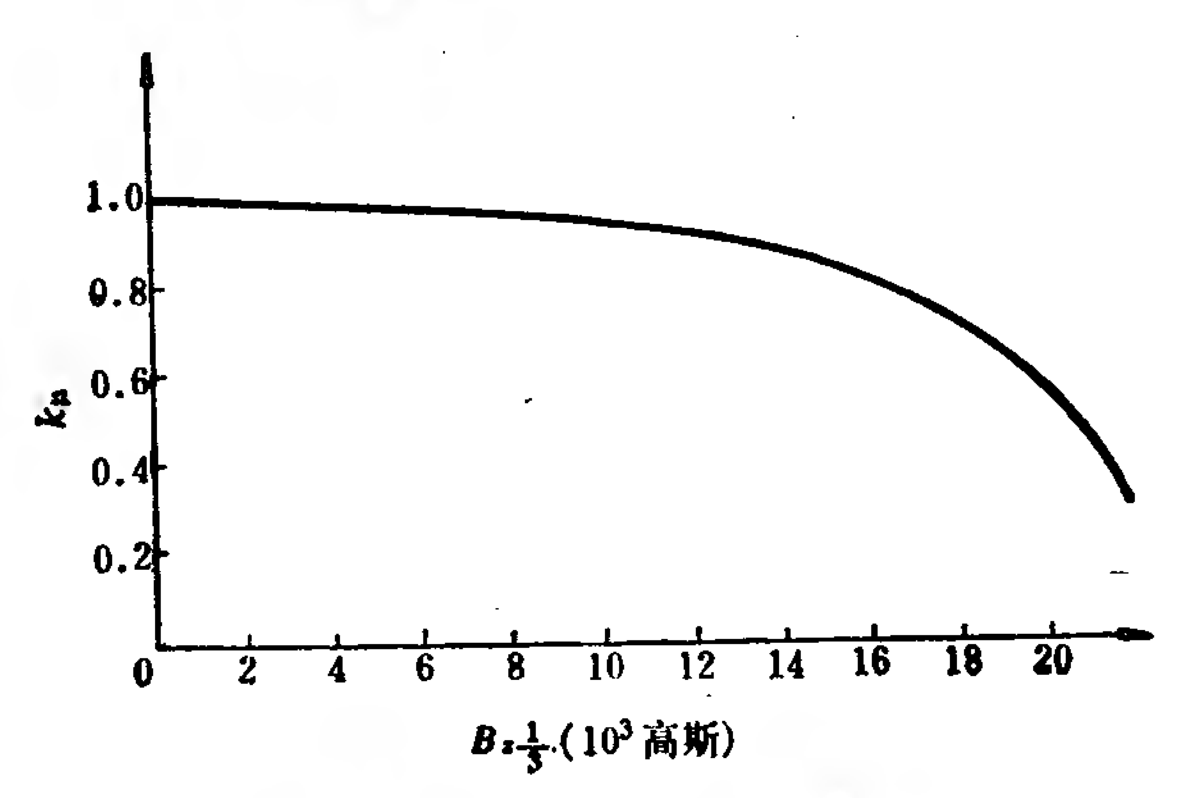


图 7-6　电感的饱和系数

C_a——标么电感，对于有补偿电动机，$C_a=0.1$；对于一般无补偿电动机，$C_a=0.4$；

k_μ——饱和系数。

图 7-6 表示电机在不同齿部磁密 $B_{z1/3}$ 时的饱和效应系数 k_μ 值。由额定状态时的齿部磁密 $B_{z1/3}$ 找出相应的 k_μ 值乘上不饱和电感即为电机的电枢饱和电感。

第八章　电磁设计例题

8-1　例题 1-电动机

给定数据:

功　　率: 7.5 千瓦;

额定电压: 220 伏;

额定转速: 1500 转/分;

防护型式: 防滴式;

励磁方式: 并励;

运行方式: 连续运行。

一、主要尺寸的选择

1. 电枢直径 D_a

计算比值 $\frac{P_N}{n_N}=\frac{7.5}{1500}=5\times10^{-3}$　(千瓦·分/转)

查图 2-2 曲线, 得 $D_a=13.5\sim15.5$ 厘米, 根据直流电机标准电枢外径, 取 $D_a=13.8$ 厘米。

2. 极数 $2p$

查图 2-7 曲线, 得 $2p=2$ 或 4, 根据生产实践, 取 $2p=4$。

3. 电磁负荷 A'、B'_δ 初选值

查图 2-3 曲线, 取 $A'=245$ 安/厘米;

查图 2-4 曲线, 取 $B'_\delta=7800$ 高斯。

4. 电枢计算长度 l_δ

查图 2-5 曲线, 选取计算极弧系数 $\alpha'_p=0.65$, 并初设 $P_{em}=1.05P_N$, 由式(2-13)计算得

$$l_\delta = \frac{6.1\times 10''}{\alpha'_p B'_\delta A' D_a^2} \times \frac{P_{em}}{n_N}$$

$$= \frac{6.1\times 10''}{0.65\times 7800\times 245\times 13.8^2} \times \frac{1.05\times 7.5}{1500}$$

$$= 13.55 \quad (厘米)$$

圆整 $l_\delta = l_a = 13.5$ 厘米。

5．极距 τ

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p} = \frac{\pi\times 13.8}{2\times 2} = 10.83 \quad (厘米)$$

6．校核比值 λ

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D_a} = \frac{13.5}{13.8} = 0.978$$

查曲线 2-6，λ 值在允许范围之内。

7．电枢周速 v_a

$$v_a = \frac{\pi D_a n_N}{60} \times 10^{-2} = \frac{\pi\times 13.8\times 1500}{60} \times 10^{-2}$$

$$= 10.85 \text{ 米/秒} < 35\sim 40 \quad (米/秒)$$

二、槽数及绕组的基本参数

8．选择绕组型式

对电动机，　　　$k_E = 0.85\sim 0.96$

预计　$E_a = k_E U_N = 0.918\times 220 = 202$　（伏）

$$I_a = \frac{P_{em}}{E_a} = \frac{1.05\times 7.5\times 10^3}{202} = 39 \quad (安)$$

因电枢电流小于 600 安，故选用单波绕组，则 $a=1$。

9．槽数 Z

根据表 3-2，$\frac{Z}{2p} = 6\sim 12$，得 $Z = 24\sim 48$，取 $Z = 27$。

10．齿距 t_a

$$t_a=\frac{\pi D_a}{Z}=\frac{\pi\times 13.8}{27}=1.605\ (厘米)>1.5\ (厘米)$$

11．校核槽电流 I_s

$$I_s=A't_a=245\times 1.605=393\ (安)<1500\ (安)$$

12．预计导体总数 N'_a

$$N'_a=\frac{\pi D_a A'}{I_a}\times 2a=\frac{\pi\times 13.8\times 245}{39}\times 2\times 1=545$$

13．每槽导体数 N'_s

$$N'_s=\frac{N'_a}{Z}=\frac{545}{27}=20.2$$

取每槽导体数 $N_s=20$(偶数)。

14．实际导体总数 N_a

$$N_a=N_sZ=20\times 27=540$$

15．每槽每层并列的元件匝数 u

考虑到单波绕组，应尽可能避免用假元件，取 $u=3$。

16．元件匝数 W_a

$$W_a=\frac{N_s}{2u}=\frac{20}{2\times 3}=3\frac{1}{3}$$

17．换向器直径 D_K

查表3-11，取 $D_K=10$ 厘米。

18．换向器片数 K

$$K=uZ=3\times 27=81$$

19．换向器片距 t_K

$$t_K=\frac{\pi D_K}{K}=\frac{\pi\times 10}{81}=0.388\ (厘米)>0.3\ (厘米)$$

20．换向器片间平均电压 U_{Kav}

$$U_{Kav}=\frac{2pU_N}{K}=\frac{2\times 2\times 220}{81}=10.86<17\quad (伏)$$

21．校核换向器周速 v_K

$$v_K=\frac{\pi D_K n_N}{6000}=\frac{\pi\times10\times1500}{6000}$$

$$=7.85\ (米/秒)<30\sim40\ (米/秒)$$

22．绕组绕制条件

$$y_K=\frac{K\pm1}{P}=\frac{81\pm1}{2}=41\ 或\ 40,\ 取\ y_K=40,$$

$$y_s=\frac{Z}{2P}\pm\varepsilon_s=\frac{27}{2\times2}\pm\varepsilon_s=7\ 或\ 6,取\ y_s=7。$$

$$y_1=y_s u=7\times3=21$$

$$y_2=y_K-y_1=40-21=19$$

23．校核绕组对称条件

$$\frac{Z}{a}=27(整数),\ \frac{K}{a}=81(整数),\ \frac{p}{a}=2(整数)。$$

24．实际线负荷 A

$$A=\frac{N_a I_a}{2a\pi D_a}=\frac{540\times39}{2\times1\times\pi\times13.8}=243\quad(安/厘米)$$

25．支路电流 i_a

$$i_a=\frac{I_a}{2a}=\frac{39}{2\times1}=19.5\quad(安)$$

26．预计电枢电密 J'_a

按图 3–5 取$(AJ'_a)=1800$ 安/厘米·安/毫米²

$$J'_a=\frac{(AJ'_a)}{A}=\frac{1800}{243}=7.41\quad(安/毫米^2)$$

27．预计导线截面 A'_{Cua}

$$A'_{Cua}=\frac{i_a}{J'_a}=\frac{19.5}{7.41}=2.63\quad(毫米^2)$$

选用QZ–1高强度聚脂漆包圆铜线,按附录表I–1及表I–3得:

$$\frac{dc}{d}=\frac{2\sim\phi1.3}{2\sim\phi1.4}\quad(毫米)$$

$$A_{Cua}=2.654\quad(毫米^2)$$

其中，d_c 为裸铜线直径，d 为绝缘铜线直径。

实际电枢电密

$$J_a=\frac{i_a}{A_{Cua}}=\frac{19.5}{2.654}=7.35 \quad (安/毫米^2)$$

实际热负荷

$(AJ_a)=243\times7.35=1785$ (安/厘米)·(安/毫米²)

三、槽形及电枢绕组

28．槽形选择

$D_a=13.8$ 厘米 <20 厘米，故选用梨形槽。

29．预计齿部磁密 B'_{ta}

取 $B'_{ta}=18750$ 高斯。

30．齿宽 b_t

$$b_t=\frac{B_\delta t_a}{k_{Fea}B'_{ta}}=\frac{7800\times1.605}{0.93\times18750}=0.718 \quad (厘米)$$

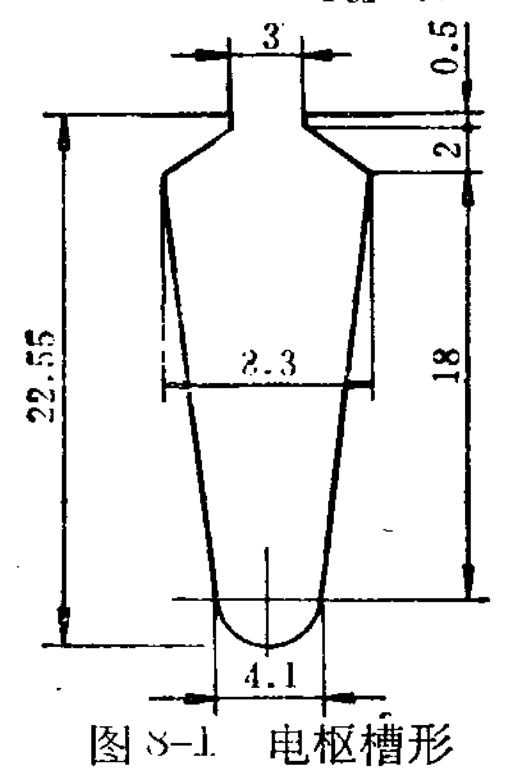


图 8-1　电枢槽形

31．槽口宽度 b_0

取 $b_0=0.3$ 厘米。

32．槽口高度 h_0

取 $h_0=0.05$ 厘米。

33．槽口梯形部分高度 h_2

取 $h_2=0.2$ 厘米。

34．槽高 h_s

按图 3-13，取 $h_s=2.255$ 厘米。

35．槽底半圆的半径 r_2

$$r_2=\frac{\frac{\pi}{Z}(D_a-2h_s)-b_t}{2\left(1-\frac{\pi}{Z}\right)}=\frac{\frac{\pi}{27}(13.8-2\times2.255)-0.718}{2\left(1-\frac{\pi}{27}\right)}$$

$$=0.205 \quad (厘米)$$

36. 槽口梯形部分宽度 b_{s1}

$$b_{s1}=\frac{\pi(D_a-2h_0-2h_2)}{Z}-b_t$$

$$=\frac{\pi(13.8-2\times0.05-2\times0.2)}{27}-0.718$$

$$=0.83 \quad (厘米)$$

37. 齿平行部分高度 h_1

$$h_1=h_s-(h_0+h_2+r_2)$$

$$=2.255-(0.05+0.2+0.205)=1.8 \quad (厘米)$$

38. 槽净面积 A_s

$$A_s=(h_1+h_2-h_K-2\delta_i)\left(\frac{b_{s1}}{2}+r_2-2\delta_i\right)$$

$$+\frac{\pi}{2}(r_2-\delta_i)^2-2\left(\frac{b_{s1}}{2}+r_2\right)\delta_i$$

$$=(1.8+0.2-0.15-2\times0.035)$$

$$\times(0.415+0.205-2\times0.035)$$

$$+\frac{\pi}{2}(0.205-0.035)^2-2(0.415+0.205)\times0.035$$

$$=0.9822 \quad (厘米)$$

式中 δ_i——槽绝缘一侧的厚度，按表3-5取 $\delta_i=0.035$ 厘米；

h_K——槽楔高度，按表3-5取 $h_K=0.15$ 厘米。

39. 导线所占面积 A_ϕ

$$A_\phi=CN_sd^2\times10^{-2}=2\times20\times1.4^2\times10^{-2}=0.784 \quad (厘米^2)$$

40. 槽满率 k_{sf}

$$k_{sf}=\frac{A_\phi}{A_s}=\frac{0.784}{0.9822}=0.797$$，在(0.75～0.8)范围之内。

41. 预计满载每极磁通 Φ'_N

$$\Phi'_N=\frac{60E_aa10^8}{pN_an_N}=\frac{60\times202\times1\times10^8}{2\times540\times1500}=0.747\times10^6 \quad (麦)$$

42．预计电枢轭高 h'_{ja}

$$h'_{ja}=\frac{\Phi'_N}{k_{Fea}l_{Fe}\times 2B'_{ja}}$$

$$=\frac{0.747\times 10^6}{0.93\times 13.5\times 2\times 12500}=2.38 \quad (厘米)$$

式中　B'_{ja}——电枢轭部磁密初选值，取 $B'_{ja}=12500$ 高斯。

43．电枢内径 D_{ia}

$$D_{ia}=D_a-2h_s-2h'_{ja}=13.8-2\times 2.255-2\times 2.38$$

$$=4.53 \quad (厘米)$$

取 $D_{ia}=4.5$ 厘米。

44．实际电枢轭高 h_{ja}

$$p_{ja}=\frac{1}{2}(D_a-2h_s-D_{ia})$$

$$=\frac{1}{2}(13.8-2\times 2.255-4.5)=2.395 \quad (厘米)$$

45．电枢轭有效高 h_{jay}

$$h_{jay}=\frac{D_a-D_{ia}}{2}-h_s+\frac{1}{3}r_2$$

$$=\frac{13.8-4.5}{2}-2.255+\frac{1}{3}\times 0.205$$

$$=2.463 \quad (厘米)$$

46．绕组平均半匝长 l_{aav}

$$l_{aav}=1.1\tau+l_a=1.1\times 10.83+13.5=25.42 \quad (厘米)$$

47．电枢绕组的导线总长 L_{Cua}

$$L_{Cua}=N_a l_{aav}=540\times 25.42=13750 \text{ 厘米}$$

48．电枢绕组铜重 G_{Cua}

$$G_{Cua}=8.9L_{Cua}A_{Cua}\times 10^{-5}=8.9\times 13750\times 2.654\times 10^{-5}$$

$$=3.25 \quad (公斤)$$

49．电枢绕组电阻 $R_{a75°C}$

$$R_{a75°C}=\frac{L_{Cua}}{A_{Cua}(2a)^2}\times 2.17\times 10^{-4}$$

$$=\frac{13750}{2.654\times(2\times 1)^2}\times 2.17\times 10^{-4}=0.282 \quad (欧)$$

四、电刷及换向器长度

50．电刷尺寸 $b_b\times l_b$

为了保证良好换向，采用电化石墨电刷 DS-72。

$$b'_b>m_W t_K=1\times 0.388=0.388 \quad (厘米)$$

按表 3-12 选用电刷尺寸为：$b_b\times l_b=10\times 12.5$ 毫米。

51．每杆电刷数 N_b

$$N'_b=\frac{I_a}{pb_bl_bJ'_b}=\frac{39}{2\times 1\times 1.25\times 7.5}=2.08$$

取 $N_b=2$。

式中　J'_b——电刷电密初选值，取 $J'_b=7.5$　安/厘米²。

实际电刷电密

$$J_b=\frac{I_a}{N_bpb_bl_b}=\frac{39}{2\times 2\times 1\times 1.25}=7.8 \quad (安/厘米^2)$$

52．换向器长度 l_K

$$l_K=N_b(l_b+0.5)+(1.0\sim 2.5)$$

$$=2(1.25+0.5)+1.5=5 \quad (厘米)$$

五、主磁极及机座尺寸

53．主磁极气隙 δ

采取偏心气隙，$\delta_{min}=0.08$ 厘米，$\delta_{max}=0.4$ 厘米，

$$\delta=0.75\delta_{min}+0.25\delta_{max}$$

$$=0.75\times 0.08+0.25\times 0.4=0.16 \quad (厘米)$$

54．主磁极极弧长 b_p

$$b'_p=\alpha'_p\tau=0.65\times 10.83=7.05 \quad (厘米)$$

$$b_p=b'_p=7.05 \quad (厘米)$$

55．主磁极长度 l_m

$$l_m = l\delta = 13.5 \quad (\text{厘米})$$

56．主磁极高度初选值 h'_m

$$h'_m = (0.45\sim0.55)D_a = (0.45\sim0.55)\times13.8$$
$$= (6.2\sim7.6) \quad (\text{厘米})$$

57．机座内径 D_{ij}

$$D_{ij} = D_a + 2\delta_{\min} + 2h_m$$
$$= 13.8 + 2\times0.08 + 2\times(6.2\sim7.6)$$
$$= (26.36\sim29.16) \quad (\text{厘米})$$

取 $D_{ij}=27.5$ 厘米。

58．主磁极实际高度 h_m

$$h_m = \frac{1}{2}(D_{ij} - D_a - 2\delta_{\min})$$
$$= \frac{1}{2}\times(27.5 - 13.8 - 2\times0.08) = 6.77 \quad (\text{厘米})$$

59．机座长度 l_j

$$l_j = (1.6\sim2.2)l\delta = (1.6\sim2.2)\times13.5$$
$$= (21.6\sim29.7) \quad (\text{厘米})$$

取 $l_j=22.3$ 厘米。

60．预计主磁极磁通 Φ'_m

$$\Phi'_m = \sigma\Phi'_N = 1.2\times0.747\times10^6 = 0.896\times10^6 \quad (\text{麦})$$

其中　σ——主磁极漏磁系数，取 $\sigma=1.2$。

61．机座轭厚 h_j

$$h_j = \frac{\Phi'_m}{2l_jB'_j} = \frac{0.896\times10^6}{2\times22.3\times12500} = 1.61 \quad (\text{厘米})$$

取 $h_j=1.6$ 厘米。

式中　B'_j——机座磁轭初选磁密，取 $B'_j=12500$ 高斯。

62．极身面积 A_m

$$A_m=\frac{\Phi'_m}{B'_m}=\frac{0.896\times10^6}{15900}=56.3\quad(\text{厘米}^2)$$

式中 B'_m——磁极极身初选磁密，取 $B'_m=15900$ 高斯。

63．主磁极极身宽 b_m

$$b_m=\frac{A_m}{k_{\text{Fe}m}l_m}=\frac{56.3}{0.95\times13.5}=4.4\quad(\text{厘米})$$

64．机座外径 D_j

$$D_j=D_{ij}+2h_j=27.5+2\times1.6=30.7\quad(\text{厘米})$$

六、换向极及换向极绕组

65．节距缩短的相应换向片数 ε_K

$$\varepsilon_K=\left|\frac{K}{2P}-y_1\right|=\left|\frac{81}{2\times2}-21\right|=\frac{3}{4}$$

66．中性区域宽度 b_n

$$b_n=\tau-b_p=10.83-7.05=3.78\quad(\text{厘米})$$

67．换向区域宽度 b_K

$$b_K=\frac{D_a}{D_K}\left[b_b+\left(u-\frac{a}{p}+\varepsilon_K\right)t_K\right]$$

$$=\frac{13.8}{10}\times\left[1+\left(3-\frac{1}{2}+\frac{3}{4}\right)\times0.388\right]=3.12\quad(\text{厘米})$$

68．换向区域和中性区域的宽度比

$$\frac{b_K}{b_n}\times100\%=\frac{3.12}{3.78}\times100\%=82.5\%>75\%$$

对于采用偏心气隙的小型电机仍可用。

69．换向极气隙 δ_K

$$\delta_K=(1.5\sim2.2)\delta=(1.5\sim2.2)\times0.16$$

$$=(0.24\sim0.352)\quad(\text{厘米})$$

取 $\delta_K=0.2$ 厘米。

70．换向极气隙系数 $k_{\delta K}$

$$k_{\delta K}=\frac{t_a}{t_a-\dfrac{b_0^2}{5\delta_K+b_0}}=\frac{1.605}{1.605-\dfrac{0.3^2}{5\times0.2+0.3}}=1.045$$

71．换向极极靴宽度 b_{pK}

$$b_{pK}=(0.6\sim0.8)b_K=(0.6\sim0.8)\times3.12$$
$$=(1.87\sim2.5)\quad(厘米)$$

取 $b_{pK}=2$ 厘米。

72．换向极极身宽度 b_{mK}

$$b_{mK}=b_{pK}=2\quad(厘米)$$

73．换向极极靴长度 l_{pK}

取 $l_{pK}=12.5$ 厘米。

74．换向极极身长度 l_{mK}

取 $l_{mK}=11$ 厘米。

75．漏磁导系数

(1) 槽漏比磁导 λ_s

$$\lambda_s=\frac{h_0}{b_0}+\frac{2h_2}{b_0+b_{s1}}+\frac{2h_1}{3(b_{s1}+d_2)}$$
$$=\frac{0.5}{3}+\frac{2\times2}{3+8.3}+\frac{2\times18}{3(8.3+4.1)}=1.49$$

(2) 齿端比磁导 λ_t

$$\lambda_t=0.15\frac{b_{pK}}{k_{\delta K}\delta_K}=0.15\frac{2}{1.045\times0.2}=1.435$$

(3) 端部比磁导 λ_E

$$\lambda_E=0.75\frac{1.1\tau}{l_\delta}=0.75\frac{1.1\times10.83}{13.5}=0.662$$

76．电刷覆盖的换向片数 β 及其计算值 β_i

$$\beta=\frac{b_b}{t_K}=\frac{1}{0.388}=2.58$$

$$\beta_j = \frac{b_b - \beta_i}{t_K} + \left(1 + \frac{a}{p}\right) = \frac{1-0.08}{0.388} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) = 2.87$$

式中　β_i——换向片间云母片的厚度，取 $\beta_i = 0.08$ 厘米。

77．互感短矩系数 k_β

按图 4-8 查得 $k_\beta = 7.8$

78．平均漏磁导系数 ξ

$$\xi = 0.4\pi\left[\frac{k_\beta}{2\beta_j}(\lambda_s + \lambda_t) + \lambda_E\right]$$

$$= 0.4\pi \times \left[\frac{7.8}{2\times 2.87} \times (1.49 + 1.435) + 0.662\right]$$

$$= 5.84$$

79．电抗电动势 e_r

$$e_r = 2W_a v_a A l_\delta \xi \times 10^{-6}$$

$$= 2\times 3\frac{1}{3} \times 10.85 \times 243 \times 13.5 \times 5.84 \times 10^{-6} = 1.385 \quad (伏)$$

80．换向极极数 $2p_K$

$$2p_K = 2p = 4$$

81．无换向极时气隙磁通密度 B_{aq}

$$B_{aq} = 1.25\frac{A}{1-\alpha_p} = 1.25\frac{243}{1-0.65} = 868 \quad (高斯)$$

82．换向极气隙磁密 $B_{\delta K}$

$$B_{\delta K} = A\xi\frac{l_\delta}{l_{pK}} + B_{aq}\frac{l_\delta - l_{pK}}{l_{pK}} + \frac{a\Delta U_b}{2pW_a v_a l_{pK}\beta} \times 10^6$$

$$= 243 \times 5.84 \times \frac{13.5}{12.5} + 868 \times \frac{13.5 - 12.5}{12.5}$$

$$+ \frac{1\times 0.75}{2\times 2\times 3\frac{1}{3} \times 10.85 \times 12.5 \times 2.58} \times 10^6$$

$$= 1756 \quad (高斯)$$

其中取 $\Delta U_b = 0.75$ 伏。

83. 换向极每极磁动势 F_K

$$F_K = 1.1 \times 0.8 B_{\delta K} k_{\delta K} \delta_K a_K + (N_a - 2pW_a\beta) \frac{\frac{K}{2p} - |\varepsilon_K|}{4aK} I_a$$

$$= 1.1 \times 0.8 \times 1756 \times 1.045 \times 0.2 \times 1$$

$$+ \left(540 - 2 \times 2 \times 3\frac{1}{3} \times 2.58\right) \times \frac{\frac{81}{2 \times 2} - \frac{3}{4}}{4 \times 1 \times 81}$$

$$\times 39 = 1510 \quad (安匝)$$

84. 换向极绕组每极匝数 W_K

$$W_K = \frac{F_K}{\frac{I_a}{a_K}} = \frac{1510}{\frac{39}{1}} = 38.7 \quad (匝)$$

取 $W_K = 39$ 匝，其中 $a_K = 1$。

85. 估算换向极绕组导线截面 A'_{A1K}

$$A'_{A1K} = \frac{I_a}{J'_{A1K} a_K} = \frac{39}{3.3 \times 1} = 11.8 \quad (毫米^2)$$

式中　J'_{A1K}——换向极绕组导线电密初选值，取 $J'_{A1K} = 3.3$ 安/毫米²。

按附录表 I-4 选用 QZB 聚酯漆包铝扁线，$\frac{a_{A1c} \times b_{A1c}}{a_{A1} \times b_{A1}} = \frac{2.1 \times 5.9}{2.23 \times 6.03}$ 毫米，实际导线截面 $A_{A1K} = 11.9$ 毫米²，实际换向极绕组电密 $J_{A1K} = \frac{I_a}{A_{A1K} a_K} = \frac{39}{11.9 \times 1} = 3.28$ 安/毫米²，采取每层匝数为 8，每极层数为 5。

86. 换向极绕组高度 h_{WK}

$$h_{WK} = 绝缘导线高 \times 每层匝数 + 0.22$$

$$= 0.603 \times 8 + 0.22 = 5.044 \quad (厘米)$$

87. 换向极绕组宽度 b_{WK}

b_{WK} = 绝缘导线宽 × 每极层数 × α + 0.025

$= 0.223\times 5\times 1.08+0.025=1.23$ （厘米）

其中取 $\alpha=1.08$。

88. 换向极绕组平均匝长 l_{Kav}

$$l_{Kav}=2(b_{mK}+l_{mK}+1.2)+\pi b_{WK}-1.72R$$

$$=2\times(2+11+1.2)+\pi\times 1.23-1.72\times 0.5$$

$$=31.41 \text{ 厘米}$$

89. 换向极绕组电阻 $R_{K75^\circ C}$

$$R_{K75^\circ C}=\frac{l_{Kav}W_K\times 2p_K}{A_{A1K}a_K^2}\times 3.46\times 10^{-4}$$

$$=\frac{31.41\times 39\times 2\times 2}{11.9\times 1^2}\times 3.46\times 10^{-4}=0.143 \text{ 欧}$$

90. 换向极绕组铝重 G_{A1K}

$$G_{A1K}=l_{Kav}W_K 2p_K A_{A1K}\times 2.7\times 10^{-5}$$

$$=31.41\times 39\times 2\times 2\times 11.9\times 2.7\times 10^{-5}$$

$$=1.58 \quad \text{（公斤）}$$

七、磁路计算

91. 电枢电路总电阻 ΣR

$$\Sigma R=R_{a75^\circ C}+R_{K75^\circ C}=0.282+0.143=0.425 \quad \text{（欧）}$$

92. 满载时额定电动势 E_N

$$E_N=U_N-I_a\Sigma R-2=220-39\times 0.425-2=201.4 \quad \text{（伏）}$$

与前估算值 E_a 相差不大于 0.5%。

93. 满载时每极磁通 Φ_N

$$\Phi_N=\frac{60E_N a\times 10^8}{pN_a n_N}=\frac{60\times 201.4\times 1\times 10^8}{2\times 540\times 1500}$$

$$=0.745\times 10^6 \quad \text{（麦）}$$

94. 实际气隙磁通密度 B_δ

$$B_\delta = \frac{\Phi_N}{b'_p l\delta} = \frac{0.745\times10^6}{7.05\times13.5} = 7830 \quad (高斯)$$

95．气隙系数 k_δ

$$k_\delta = \frac{t_a}{t_a - \dfrac{b_0^2}{5\delta+b_0}} = \frac{1.605}{1.605 - \dfrac{0.3^2}{5\times0.16+3}} = 1.054$$

96．每极气隙磁动势 F_δ

$$F_\delta = 0.8B_\delta\delta k_\delta = 0.8\times7830\times0.16\times1.054 = 1056 \quad (安)$$

97．齿中视在磁密 B'_{ta}

$$B'_{ta} = \frac{B_\delta t_a}{k_{Fea}b_t} = \frac{7830\times1.605}{0.93\times0.718} = 18820 \quad (高斯)$$

98．齿部校正系数 k_t

$$k_t = \frac{\dfrac{b_{s1}}{2}+r_2}{k_{Fea}b_t} = \frac{\dfrac{0.83}{2}+0.205}{0.93\times0.718} = 0.93$$

由图 5-5 查得 $H_{ta}=148.5$ 安/厘米，$B_{ta}=18650$ 高斯。

99．齿部磁路计算长度 L_{ta}

$$L_{ta} = h_1 + \frac{2}{3}(h_2+r_2)$$

$$= 1.8 + \frac{2}{3}\times(0.2+0.205) = 2.07 \quad (厘米)$$

100．每极齿部磁动势 F_{ta}

$$F_{ta} = L_{ta}H_{ta} = 2.07\times148.5 = 308 \quad (安)$$

101．电枢轭部磁通密度 B_{ja}

$$B_{ja} = \frac{\Phi_N}{2k_{Fea}h_{jay}l_a} = \frac{0.745\times10^6}{2\times0.93\times2.463\times13.5}$$

$$= 12000 \quad (高斯)$$

由表 II-1 查得 $H_{ja}=6.08$ 安/厘米。

102．电枢轭磁路长度 L_{ja}

$$L_{ja}=\frac{\pi}{4P}(D_a-2h_s-h_{ja})$$

$$=\frac{\pi}{4\times2}\times(13.8-2\times2.255-2.395)=2.7\quad(厘米)$$

103．每极电枢轭部磁动势 F_{ja}

$$F_{ja}=L_{ja}H_{ja}=2.7\times6.08=16.4\quad(安)$$

104．主磁极磁通 Φ_m

$$\Phi_m=\sigma\Phi_N=1.2\times0.745\times10^6=0.894\times10^6\quad(麦)$$

105．主极铁心磁通密度 B_m

$$B_m=\frac{\Phi_m}{k_{Fem}b_ml_m}=\frac{0.894\times10^6}{0.95\times4.4\times13.5}=15800\quad(高斯)$$

查表 II–2DT–1 低炭钢片，$H_m=17.8$ 安/厘米。

106．每极主极磁动势 F_m

$$F_m=h_mH_m=6.77\times17.8=120.5\quad(安)$$

107．机座轭部磁密 B_j

$$B_j=\frac{\Phi_m}{2h_jl_j}=\frac{0.894\times10^6}{2\times1.6\times22.3}=12500\quad(高斯)$$

查表 II–4 得 $H_j=14.3$ 安/厘米。

108．机座轭部磁路长度 L_j

$$L_j=\frac{\pi(D_j-h_j)}{4p}=\frac{\pi\times(30.7-1.6)}{4\times2}=11.42\quad(厘米)$$

109．机座轭每极磁动势 F_j

$$F_j=L_jH_j=11.42\times14.3=163\quad(安)$$

110．每极总的磁动势 ΣF

$$\Sigma F=F_\delta+F_{ta}+F_{ja}+F_m+F_j$$

$$=1056+308+16.4+120.5+163=1664\quad(安)$$

111．稳定系数 k_y

$$k_y=\frac{F_\delta+F_{ta}}{0.5b'_vA}=\frac{1056+308}{0.5\times7.05\times243}=1.59$$

k_y 一般在 0.95～1.25 之内，今 $k_y>1.25$，表示比较稳定。

八、空载特性及转速调整率

112．空载特性曲线的计算

见表 8–1。

表 8–1　空载特性曲线表

Φ/Φ_N	0.5	0.7	0.9	1.0	1.05	1.1	1.15
E_N	101	141	181.5	201.4	211.5	221.5	232
Φ_N	0.372×10^6	0.522×10^6	$0.67\ 10^6$	0.745×10^6	0.782×10^6	0.82×10^6	0.857×10^6
B_δ	3920	5480	7050	7830	8220	8600	9000
F_δ	528	739	950	1056	1110	1160	1215
B_{ta}	9410	13190	16950	18820	19750	20700	21650
H_{ta}	3.2	8.65	58.5	148.5	219	311	541
F_{ta}	6.6	17.9	121	308	454	644	1120
B_{ja}	6000	8400	10800	12000	12600	13200	13800
H_{ja}	1.54	2.55	4.38	6.08	7.24	8.68	10.7
F_{ja}	4.16	6.9	11.8	16.4	19.5	23.4	28.9
Φ_m	0.447×10^6	0.626×10^6	0.805×10^6	0.894×10^6	0.938×10^6	0.893×10^6	1.028×10^6
B_m	7900	11050	14220	15800	16600	17400	18200
H_m	3.24	5.97	9.14	17.8	34	62	104
F_m	22	40.5	61.8	120.5	230	420	705
B_j	6250	8750	11250	12500	13100	13750	14400
H_j	5.11	7.71	11.37	14.3	16.3	19.5	23.7
F_j	58.3	88	130	163	186	222.5	271
ΣF	619	892.3	1275	1664	2000	2470	3340

113．交轴电枢反应每极磁动势 $0.5b'_pA$

$$0.5b'_pA=0.5\times7.05\times243=856\quad(\text{安})$$

114．交轴电枢反应每极去磁磁动势 F_{aqd}

由作图法得　　$F_{aqd}=203$　（安）

115．满载时所需的并励磁动势 F_f

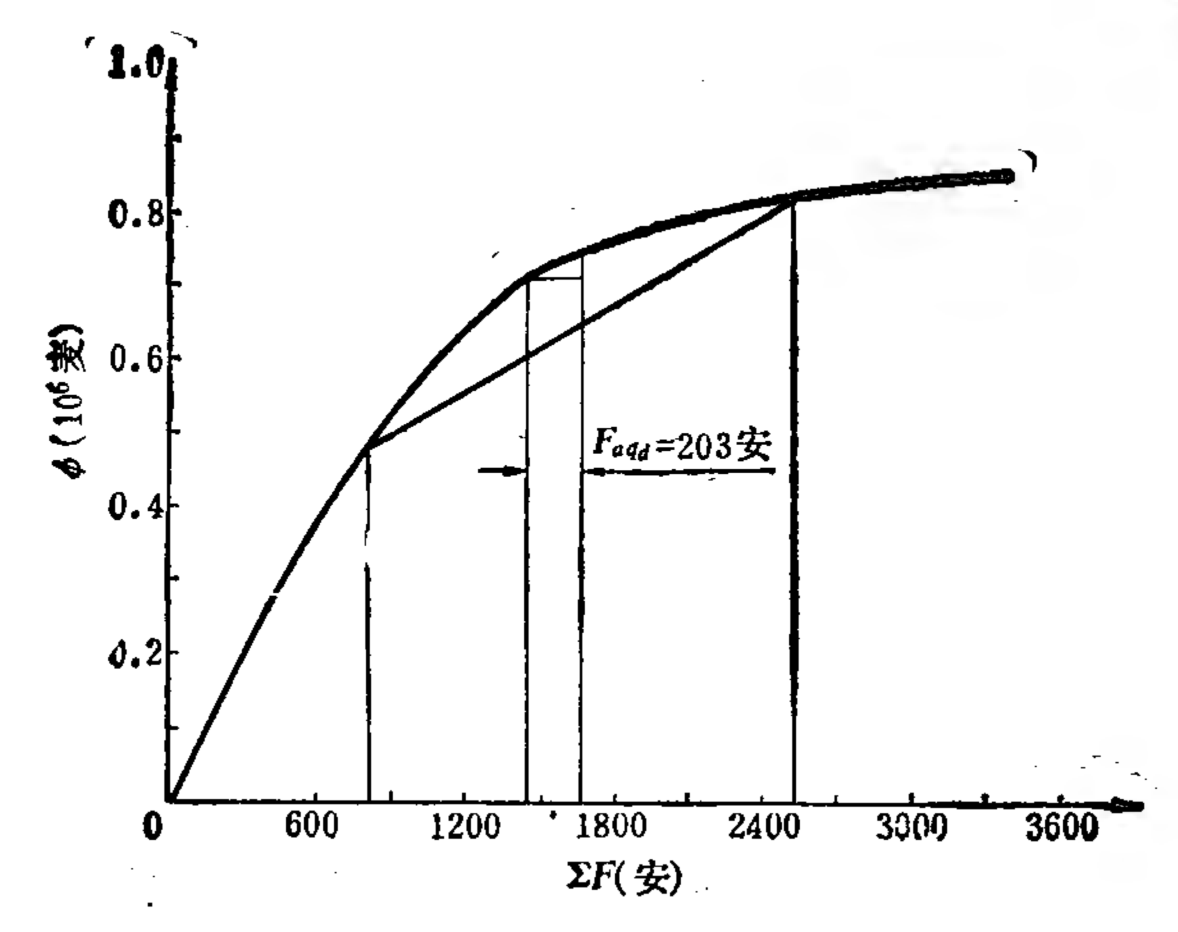


图 8-2　7.5千瓦直流电动机的去磁安匝

$$F_f=\Sigma F+F_{aqd}=1664+203=1867 \quad (安)$$

116. 空载磁通 Φ_0

对应于 $F_f=1867$ 安，由空载特性曲线查得 $\Phi_0=0.773\times10^6$ 麦。

117. 空载转速 n_0

$$n_0=\frac{60aU_N\times10^8}{pN_a\Phi_0}=\frac{60\times1\times220\times10^8}{2\times540\times0.773\times10^6}$$
$$=1582.5 \quad (转/分)$$

118. 转速调整率 Δn

$$\Delta n=\frac{n_0-n_N}{n_N}=\frac{1582.5-1500}{1500}=5.5\%<15\%$$

九、并励绕组

119. 预计并励绕组平均匝长 l'_{fav}

$$l'_{fav}=2.4(l_m+b_m+1.2)=2.4(13.5+4.4+1.2)$$
$$\doteq45.8 \quad (厘米)$$

120. 预计并励绕组导线截面 A'_{Alf}

$$A'_{\mathrm{Alf}}=\frac{2Pl'_{fav}F_f\rho_f k_f}{U_N}$$

$$=\frac{2\times2\times45.8\times1867\times3.46\times10^{-4}\times1.05}{220}$$

$$=0.565\quad(\text{毫米}^2)$$

式中　k_f——励磁余量，取 $k_f=1.05$。

选用 QZL-1 聚酯漆包铝线，按表 I-1 及表 I-3 查得：$\frac{dc}{d}=\frac{0.83}{0.855}$ 毫米，$A_{\mathrm{Alf}}=0.541$ 毫米²。

121．预计并励电流 I'_{fN}

$$I'_{fN}=A_{\mathrm{Alf}}J'_{\mathrm{Alf}}=0.541\times3.14=1.7\quad(\text{安})$$

式中　J'_f——并励绕组电密初选值，取 $J'_{\mathrm{Alf}}=3.14$ 安/毫米²。

122．每极匝数 W_f、并励电流 I_{fN} 和并励绕组电密 J_{Alf}

$$W_f=\frac{F_f}{I'_{fN}}=\frac{1867}{1.7}=1100\quad(\text{匝})$$

$$I_{fN}=\frac{F_f}{W_f}=\frac{1867}{1100}=1.7\quad(\text{安})$$

$$J_{\mathrm{Alf}}=\frac{I_{fN}}{A_{\mathrm{Alf}}}=\frac{1.7}{0.541}=3.14\quad(\text{安/毫米}^2)$$

123．并励线圈的排列

共 20 层，每层绕 55 匝。

124．并励线圈尺寸

(1) 内尺寸

$$a=l_m+0.6=13.5+0.6=14.1\quad(\text{厘米})$$

$$b=b_m+0.6=4.4+0.6=5\quad(\text{厘米})$$

(2) 外尺寸

$$H=(\text{绝缘导线直径}\times\text{每层匝数})+0.22$$

$$=(0.0855\times55)+0.22=4.92\quad(\text{厘米})$$

$$A=2\times(\text{绝缘导线直径}\times\text{层数})\times\alpha+0.05+a$$
$$=2\times(0.0855\times20)\times1+0.05+14.1$$
$$=17.57\quad(\text{厘米})$$

$$B=2\times(\text{绝缘导线直径}\times\text{层数})\times\alpha+0.05+b$$
$$=2\times(0.0855\times20)\times1+0.05+5=8.47\quad(\text{厘米})$$

(3) 线圈厚度 b_{wf}

$$b_{wf}=\text{绝缘导线直径}\times\text{层数}\times\alpha$$
$$=0.0855\times20\times1=1.71\quad(\text{厘米})$$

125．并励绕组实际平均匝长 l_{fav}

$$l_{fav}=2(b_m+l_m+1.2)+\pi b_{wf}-1.72R$$
$$=2(4.4+13.5+1.2)+\pi\times1.71-1.72\times0.5$$
$$=42.7\quad(\text{厘米})$$

126．并励绕组导线总长 L_f

$$L_f=l_{fav}W_f\times2p=42.7\times1100\times2\times2$$
$$=1.88\times10^5\quad(\text{厘米})$$

127．并励绕组铝重 G_{Alf}

$$G_{Alf}=L_fA_{Alf}\times2.7\times10^{-5}$$
$$=1.88\times10^5\times0.541\times2.7\times10^{-5}=2.74\quad(\text{公斤})$$

128．并励绕组电阻 $R_{f75^\circ C}$

$$R_{f75^\circ C}=\frac{2pW_f\rho_f l_{fav}}{A_{Alf}}=\frac{2\times2\times1100\times3.46\times10^{-4}\times42.7}{0.541}$$
$$=120\quad(\text{欧})$$

129．最大励磁电流 $I_{f\max}$

$$I_{f\max}=\frac{U_N}{R_{f75^\circ C}}=\frac{220}{120}=1.835\quad(\text{安})$$

130．励磁余量 k_f

$$k_f=\frac{I_{f\max}}{I_{fN}}=\frac{1.835}{1.7}=1.08$$

十、损耗与效率

131. 电枢绕组铜耗 P_{Cua}

$$P_{Cua}=I_a^2R_{a75°C}=39^2\times0.282=429 \quad （瓦）$$

132. 换向极绕组铝耗 P_{AlK}

$$P_{AlK}=I_a^2R_{K75°C}=39^2\times0.143=217.5 \quad （瓦）$$

133. 电刷接触电损耗 P_b

$$P_b=\Delta U_bI_a=2\times39=78 \quad （瓦）$$

134. 励磁电路损耗 P_{Alf}

$$P_{Alf}=U_NI_{fN}=220\times1.7=374 \quad （瓦）$$

135. 总的电损耗 P_{Cu}

$$P_{Cu}=P_{Cua}+P_{AlK}+P_b+P_{Alf}$$
$$=429+217.5+78+374=1098.5 \quad （瓦）$$

136. 电枢铁心交变磁化频率 f

$$f=\frac{pn_N}{60}=\frac{2\times1500}{60}=50 \quad （赫兹）$$

137. 电枢轭部重量 G_{Feja}

$$G_{Feja}=\gamma_{Fe}\pi(D_a-2h_s-h_{ja})l_ah_{ja}k_{Fea}$$
$$=7.8\times10^{-3}\pi(13.8-2\times2.255-2.395)$$
$$\times13.5\times2.395\times0.93=5.07 \quad （公斤）$$

138. 电枢齿部重量 G_{Feta}

$$G_{Feta}=\gamma_{Fe}Zb_th_sl_ak_{Fea}$$
$$=7.8\times10^{-3}\times27\times0.718\times2.255\times13.5\times0.93$$
$$=4.27 \quad （公斤）$$

139. 铁耗 P_{Fe}

(1) 查表6-1，D_{23} 硅钢片的铁耗系数 $p_{10/50}=2.1$ 瓦/公斤。

(2) 铁耗系数

$$p_{\mathrm{Feta}}=p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}\left(\frac{B_{ta}}{10000}\right)^2$$

$$=2.1\times\left(\frac{50}{50}\right)^{1.3}\times\left(\frac{18650}{10000}\right)^2=7.31\quad(\text{瓦/公斤})$$

$$p_{\mathrm{Feja}}=p_{10/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}\left(\frac{B_{ja}}{10000}\right)^2$$

$$=2.1\times\left(\frac{50}{50}\right)^{1.3}\times\left(\frac{12000}{10000}\right)^2=3.02\quad(\text{瓦/公斤})$$

(3) 铁耗

$$P_{\mathrm{Feta}}=k_{ta}p_{\mathrm{Feta}}G_{\mathrm{Feta}}=2.8\times7.31\times4.27=87.5\quad(\text{瓦})$$

$$P_{\mathrm{Feja}}=k_{ja}p_{\mathrm{Feja}}G_{\mathrm{Feja}}=2.1\times3.02\times5.07=32.2\quad(\text{瓦})$$

$$P_{\mathrm{Fe}}=P_{\mathrm{Feta}}+P_{\mathrm{Feja}}=87.5+32.2=119.7\quad(\text{瓦})$$

140. 机械损耗 P_{fW}

(1) 风磨损耗 $P_{fv}+P_{fbr}$

由图 6-6 查得，$P_{fv}+P_{fbr}=64$(瓦)

(2) 电刷摩擦损耗 P_{fb}

$$P_{fb}=9.81k_{fb}F_bA_bv_k=0.4b_bl_bN_b2pv_K$$

$$=0.4\times1\times1.25\times2\times2\times2\times7.85=31.4\quad(\text{瓦})$$

其中 $9.81k_{fb}F_b=9.81\times0.2\times0.204=0.4$。

(3) 机械损耗 P_{fW}

$$P_{fW}=P_{fv}+P_{fbr}+P_{fb}=64+31.4=95.4\quad(\text{瓦})$$

141. 附加损耗 P_{ad}

$$P_{ad}=0.01U_NI_N=0.01U_N(I_a+I_{fN})$$

$$=0.01\times220\times(39+1.7)=89.6\quad(\text{瓦})$$

142. 总损耗 ΣP

$$\Sigma P=P_{\mathrm{Ca}}+P_{\mathrm{Fe}}+P_{fW}+P_{ad}$$

$$=1098.5+119.7+95.4+89.6=1403.2\quad(\text{瓦})$$

143．效率 η

$$\eta=\frac{U_N I_N-\Sigma P}{U_N I_N}=\frac{220\times40.7-1403.2}{220\times40.7}=84.3\%$$

8-2 例题 2-发电机

给定数据:

功　　率: 1150 千瓦;

额定电压: 660 伏;

额定转速: 1000 转/分;

防护型式: 开启式;

励磁方式: 他励;

励磁电压: 220 伏;

运行方式: 连续运行。

一、主要尺寸的选择

1．电枢直径 D_a

计算比值 $\frac{P_N}{n_N}=\frac{1150}{1000}=1.15$ 千瓦·分/转

查图 2-2 曲线，得 $D_a=63\sim85$ 厘米，根据直流电机标准电枢外径及生产实践经验，取 $D_a=85$ 厘米。

2．极数 $2p$

查图 2-7 曲线，得 $2p=6$。

3．电磁负荷 A'、B_δ 初选值

查图 2-3 曲线，取 $A'=480$ 安/厘米;

查图 2-4 曲线，取 $B'_\delta=8800$ 高斯。

4．电枢计算长度 l_δ

查图 2-5 曲线，选取计算极弧系数 $\alpha'_p=0.728$，并初设 $P_{em}=1.03P_N$，由式(2-13)计算得

$$l_\delta=\frac{6.1\times10^{11}}{\alpha'_p B'_\delta A' D_a^2}\,\frac{P_{em}}{n_N}$$

$$=\frac{6.1\times10^{11}}{0.723\times8800\times480\times85^2}\,\frac{1.03\times1150}{1000}=32.7\quad(\text{厘米})$$

圆整 $l_\delta=32$ 厘米。

电枢分成四个叠片组，每一叠片组长度为

$$l'=7.25\quad(\text{厘米})$$

径向通风沟的数目

$$N_{vr}=3$$

径向通风沟的宽度

$$b_v=1\quad(\text{厘米})$$

电枢总长

$$l_a=(N_{vr}+1)l'+N_{vr}b_v=(3+1)\times7.25+3\times1=32\quad(\text{厘米})$$

其中 $(N_{vr}+1)l'=l_{Fe}=29$ 厘米。

5. 极距 τ

$$\tau=\frac{\pi D_a}{2p}=\frac{\pi\times85}{2\times3}=44.5\quad(\text{厘米})$$

6. 校核比值 λ

$$\lambda=\frac{l_\delta}{D_a}=\frac{32}{85}=0.377$$

查曲线 2-6，λ 值在允许范围之内。

7. 电枢周速 v_a

$$v_a=\frac{\pi D_a n_N}{60}\times10^{-2}=\frac{\pi\times85\times1000}{60}\times10^{-2}$$

$$=44.5\ \text{米/秒}<55\ \text{米/秒}$$

二、槽数及绕组的基本参数

8. 选择绕组型式

对发电机，$k_E=1.04\sim1.14$

预计 $E_a = k_E U_N = 1.03 \times 660 = 680$ 伏

$$I_a = \frac{P_{em}}{E_a} = \frac{1.03 \times 1150}{680} = 1743 \quad (\text{安})$$

选用单蛙绕组，则 $a = a_L + a_W = 2p = 6$

其中 a_L 和 a_W 分别为单叠绕组和三波绕组的支路对数。

9．槽数 Z

根据表 3-2，$\frac{Z}{2p} = 12 \sim 22$，得 $Z = 72 \sim 132$，取 $Z = 75$。

10．齿距 t_a

$$t_a = \frac{\pi D_a}{Z} = \frac{\pi \times 85}{75} = 3.56 \quad (\text{厘米})$$

t_a 在(2～4)厘米范围内。

11．校核槽电流 I_s

$$I_s = A' t_a = 480 \times 3.56 = 1710 \text{ 安} > 1500 \text{ 安}$$

槽电流略大一些，根据生产实践经验，可以允许选取。

12．预计导体总数 N'_a

$$N'_a = \frac{\pi D_a A'}{I_a} 2a = \frac{\pi \times 85 \times 480}{1743} \times 2 \times 6 = 882$$

13．每槽导体数 N'_s

$$N'_s = \frac{N'_a}{Z} = \frac{882}{75} = 11.75$$

取每槽导体数 $N_s = 12$(偶数)。

14．实际导体总数 N_a

$$N_a = N_s Z = 12 \times 75 = 900$$

15．每槽每层并列的元件数 u

取 $u = 3$。

16．元件匝数 W_a

$$W_a = \frac{N_s}{4u} = \frac{12}{4 \times 3} = 1$$

即叠绕和波绕的元件匝数各为1。

17．换向器直径 D_K

由表3-11，取 $D_K=55$ 厘米。

18．换向器片数 K

$$K=uZ=3\times75=225$$

19．换向器片距 t_K

$$t_K=\frac{\pi D_K}{K}=\frac{\pi\times55}{225}=0.768>0.45 \quad (\text{厘米})$$

20．换向器片间平均电压 U_{Kav}

$$U_{Kav}=\frac{2pU_N}{K}=\frac{2\times3\times660}{225}$$

$$=17.6\text{伏}<22\text{伏}(\text{有补偿绕组的情况})$$

21．校核换向器周速 v_K

$$v_K=\frac{\pi D_K n_N}{6000}=\frac{\pi\times55\times1000}{6000}$$

$$=28.8\text{米/秒}<(30\sim40) \quad (\text{米/秒})$$

22．绕组绕制条件

$m_W=3$(波绕组)，$m_L=1$(叠绕组)，$m_W=pm_L$

$$y_{1W}+y_{1L}=\frac{K}{p}=\frac{225}{3}=75$$

$$y_{KW}+y_{KL}=\frac{K}{p}=\frac{225}{3}=75$$

$$y_{KW}=\frac{K-m_W}{p}=\frac{225-3}{3}=74$$

$$y_{KL}=m_L=1$$

$y_{Ws}=\dfrac{Z}{2p}\pm\varepsilon_s=\dfrac{75}{2\times3}\pm\varepsilon_s=13$ 或 12，取 $y_{Ws}=13$。

$y_{Ls}=\dfrac{Z}{2p}\pm\varepsilon_s=\dfrac{75}{2\times3}\pm\varepsilon_s=13$ 或 12，取 $y_{Ls}=12$。

$$y_{1W}=y_{Ws}u=13\times3=39$$

$$y_{1L}=y_{Ls}u=12\times3=36$$

$$y_{2W}=y_{2L}=y_{1L}-1=36-1=35$$

绕组为同槽式元件。

23. 校核绕组对称条件

$$\frac{Z}{a_W}=\frac{75}{3}=25(\text{整数})$$

$$\frac{K}{a_W}=\frac{225}{3}=75(\text{整数})$$

$$\frac{p}{a_W}=\frac{3}{3}=1(\text{整数})$$

24. 实际电负荷 A

$$A=\frac{N_aI_a}{2a\pi D_a}=\frac{900\times1743}{2\times6\times\pi\times85}=490\quad(\text{安/厘米})$$

25. 支路电流 i_a

$$i_a=\frac{I_a}{2a}=\frac{1743}{2\times6}=145\quad(\text{安})$$

26. 预计电枢电密 J'_a

按图 3-5 取 $(AJ'_a)=3100$ 安/厘米·安/毫米²,

$$J'_a=\frac{(AJ'_a)}{A}=\frac{3100}{490}=6.33\quad(\text{安/毫米}^2)$$

27. 预计导线截面 A'_{Cua}

$$A'_{Cua}=\frac{i_a}{J'_a}=\frac{145}{6.33}=22.9\quad(\text{毫米}^2)$$

选用双玻璃丝包扁铜线,

$$\frac{a_c\times b_c}{a\times b}=\frac{2\sim1.68\times6.9^{\ominus}}{2\sim2.02\times7.24},\ A_{Cua}=22.8\quad(\text{毫米}^2)$$

其中 $a_c\times b_c$ 为裸铜丝尺寸，$a\times b$ 为绝缘铜丝尺寸。

⊖ 新标准中已不用这个线规，因沿用生产实践的数据，故取此规格。以后所选的线规亦同样处理，不再另作说明。

实际电枢电密

$$J_a=\frac{i_a}{A_{Cua}}=\frac{145}{22.8}=6.37\quad(安/毫米^2)$$

$$实际热负荷(AJ_a)=490\times6.37$$
$$=3120\quad(安/厘米)\cdot(安/毫米^2)$$

三、槽形及电枢绕组

28. 槽形选择

在大、中型电机中，通常采用开口矩形槽。

由图 3-13 查得槽高初步值：$h'_s=(37\sim57)$毫米。

根据所选绝缘导线尺寸及工厂的槽绝缘规范算得

$$h_s=4H+8.74$$
$$=4\times7.24+8.74$$
$$=37.7\quad(毫米)$$

取 $h_s=37.5$ 毫米。

式中 H——绝缘导线高度；

8.74——槽高方向总的绝缘厚度。

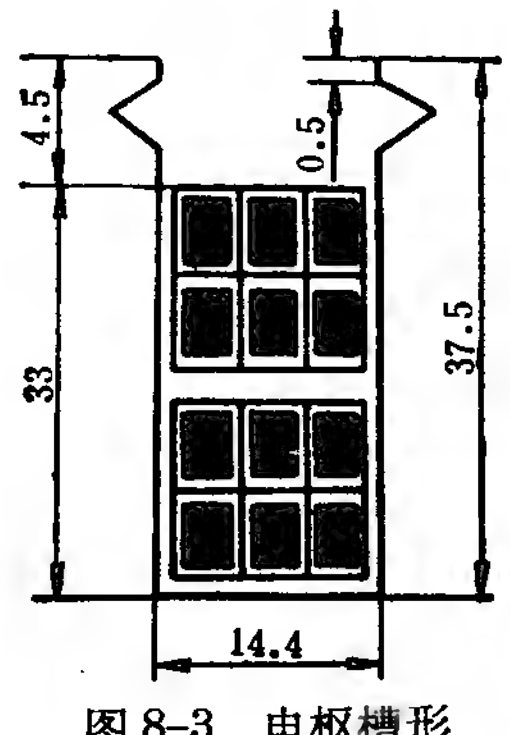


图 8-3 电枢槽形

$$b_s=uB+2.27=3\times2\times2.02+2.27=14.39\quad(毫米)$$

取 $b_s=14.4$ 毫米。

式中 B——绝缘导线总宽度；

2.27——槽宽方向总的绝缘厚度。

29. 校核齿根磁密 B'_{ta3}

$$b_{tai}=\frac{\pi(D_a-2h_s)}{Z}-b_s$$

$$=\frac{\pi(85-2\times3.75)}{75}-1.44=1.805\quad(厘米)$$

$$B'_{ta3}=\frac{t_a B'_\delta l_\delta}{k_{Fea} b_{ta3} l_{Fe}}=\frac{3.56\times 8800\times 32}{0.93\times 1.805\times 29}$$

$$=20600 \text{ 高斯} < 24500 \text{ 高斯}$$

如 B'_{ta3} 大于 24500 高斯，则应重新选择绝缘导线尺寸及相应的槽形尺寸，以满足齿根磁密不超过规定限值的要求。

30．预计满载每极磁通 Φ'_N

$$\Phi'_N=\frac{60E_a a\times 10^8}{pN_a n_N}=\frac{60\times 680\times 6\times 10^8}{3\times 900\times 1000}$$

$$=9.06\times 10^6 \quad (\text{麦})$$

31．预计电枢轭高 h'_{ja}

$$h'_{ja}=\frac{\Phi'_N}{k_{Fea} l_{Fe}\times 2B'_{ja}}$$

$$=\frac{9.06\times 10^6}{0.93\times 29\times 2\times 11500}=14.62 \quad (\text{厘米})$$

式中 B'_{ja}——电枢轭初选磁密，取 $B'_{ja}=11500$ 高斯。

取 $h_{ja}=14.1$ 厘米。

32．电枢内径 D_{ia}

$$D_{ia}=D_a-2h_s-2h_{ja}$$

$$=85-2\times 3.75-2\times 14.1=49.3 \quad (\text{厘米})$$

33．绕组平均半匝长 l_{aav}

$$l_{aav}=1.4\tau+l_a=1.4\times 44.5+32=94.3 \quad (\text{厘米})$$

34．电枢绕组的导线总长 L_{Cua}

$$L_{Cua}=N_a l_{aav}=900\times 94.3=84900 \quad (\text{厘米})$$

35．电枢绕组的铜重 G_{Cua}

$$G_{Cua} 8.9 L_{Cua} A_{Cua}\times 10^{-5}=8.9\times 84900\times 22.8\times 10^{-5}$$

$$=172 \quad (\text{公斤})$$

36．电枢绕组电阻 $R_{a75^\circ C}$

$$R_{a75°C}=\frac{L_{Cua}}{A_{Cua}(2a)^2}\times2.17\times10^{-4}$$

$$=\frac{84900}{22.8\times(2\times6)^2}\times2.17\times10^{-4}=0.0056\quad(欧)$$

四、电刷及换向器长度

37．电刷尺寸 $b_b\times l_b$

为了换向性能良好，根据生产实践经验，采用电化石墨电刷 DS-74B。

对于单蛙绕组，应使电刷宽度

$$b'_b>m_W t_K=3\times0.768=2.304\quad(厘米)$$

当 b_b 接近于 2 厘米时，常用双刷结构，故采用 $n_b\sim b_b=2\sim12.5$ 毫米。按表 3-12 取 $l_b=32$ 毫米。

故 $n_b\sim b_b\times l_b=2\sim12.5\times32$ 毫米。

38．每杆电刷数 N_b

$$N_b=\frac{I_a}{pn_b b_b l_b J'_b}=\frac{1743}{3\times2\times1.25\times3.2\times9}=8.06$$

式中　J'_b——电刷电流密度初选值，常取 $J'_b<12$ 安/厘米²。

取 $N_b=8$。

实际电刷电密 $J_b=\dfrac{I_a}{pn_b b_b l_b N_b}$

$$=\frac{1743}{3\times2\times1.25\times3.2\times8}$$

$$=9.08\ 安/厘米^2。$$

39．换向器长度 l_K

$$l_K=N_b(l_b+0.5)+(1.0\sim2.5)$$

$$=8(3.2+0.5)+2.5=32.1\quad(厘米)$$

五、主磁极及机座尺寸

40．主磁极气隙 δ

因所设计的电机带有补偿绕组，故主极气隙可取为均匀的。

$$\delta=(0.006\sim0.009)D_a=(0.006\sim0.009)\times85$$
$$=(0.51\sim0.765)\quad（厘米）$$

取 $\delta=0.5$ 厘米。

41．主磁极计算极弧长 b'_p

$$b'_p=\alpha'_p\tau=0.723\times44.5=32.2\quad（厘米）$$

42．主磁极极弧长 b_p

$$b_p=b'_p-2\delta=32.2-2\times0.5=31.2\quad（厘米）$$

43．主磁极长度 l_m

$$l_m=l_\delta=32\quad（厘米）$$

44．主磁极高度 h_m

$$h_m=(0.7\sim0.9)b'_p=(0.7\sim0.9)\times32.2$$
$$=(22.5\sim29)\quad（厘米）$$

取 $h_m=22$厘米。

45．机座内径 D_{ij}

$$D_{ij}=D_a+2\delta+2h_m=85+2\times0.5+2\times22=130\quad（厘米）$$

46．机座长度 l_j

$$l_j=(1.6\sim2.2)l_\delta=(1.6\sim2.2)\times32$$
$$=(51.2\sim70.5)\quad（厘米）$$

取 $l_j=62$ 厘米。

47．预计主磁极磁通 Φ'_m

$$\Phi'_m=\sigma\Phi'_N=1.15\times9.06\times10^6=10.4\times10^6\quad（麦）$$

式中　σ——主磁极漏磁系数，取 $\sigma=1.15$。

48．机座轭厚 h_j

$$h_j=\frac{\Phi'_m}{2l_jB'_j}=\frac{10.4\times10^6}{2\times62\times10500}=8\quad（厘米）$$

式中　B'_j——机座磁轭初选磁密，取 $B'_j=10500$ 高斯。

49．极身面积 A_m

$$A_m=\frac{\Phi'_m}{B'_m}=\frac{10.4\times10^6}{14400}=722\quad(\text{厘米})$$

式中　B'_m——磁极极身初选磁密，取 $B'_m=14400$ 高斯。

50．主磁极极身宽 b_m

$$b_m=\frac{A_m}{k_{\text{Fep}}l_m}=\frac{722}{0.94\times32}=24\quad(\text{厘米})$$

51．机座外径 D_j

$$D_j=D_{ij}+2h_j=130+2\times8=146\quad(\text{厘米})$$

六、换向极及换向参数计算

52．节距缩短的相应换向片数 ε_K

$$\varepsilon_K=\left|\frac{K}{2p}-y_{1L}\right|=\left|\frac{225}{2\times3}-36\right|=1.5$$

53．中性区域宽度 b_n

$$b_n=\tau-b_p=44.5-31.2=13.3\quad(\text{厘米})$$

54．换向区域宽度 b_K

$$b_K=\frac{D_a}{D_K}\left[b_b+\left(u-\frac{a_L}{p}+\varepsilon_K\right)t_K\right]$$

$$=\frac{85}{55}\times\left[2\times1.25+0.2+\left(3-\frac{3}{3}+1.5\right)\times0.768\right]$$

$$=8.33\quad(\text{厘米})$$

式中　b_b——电刷宽度，$b_b=n_bb_b+0.2$；

0.2——双电刷刷握中间隔板厚度；

a_L——为叠绕组支路对数。

55．换向区域和中性区域的宽度比

$$\frac{b_K}{b_n}\times100\%=\frac{8.33}{13.3}\times100\%=62.6\%<65\%$$

56．主磁场与换向极磁场的距离

$$\frac{b_n-b_K}{2}=\frac{13.3-8.33}{2}=2.485\quad(\text{厘米})$$

57．换向极第一气隙 δ_{K1}

$$\delta_{K1}=(1.5\sim2.2)\delta=(1.5\sim2.2)\times0.5$$
$$=(0.75\sim1.1)\quad(\text{厘米})$$

取 $\delta_{K1}=1.1$ 厘米。

58．换向极气隙系数 $k_{\delta K}$

$$k_{\delta K}=\frac{(5\delta_{K1}+b_s)t_a}{(5\delta_{K1}+b_s)t_a-b_s^2}\times\frac{(5\delta_{K1}+b_v)\dfrac{l_a}{N_{vr}+1}}{(5\delta_{K1}+b_v)\dfrac{l_a}{N_{vr}+1}-b_v^2}$$

$$=\frac{(5\times1.1+1.44)\times3.56}{(5\times1.1+1.44)\times3.56-1.44^2}$$

$$\times\frac{(5\times1.1+1)\times\dfrac{32}{3+1}}{(5\times1.1+1)\times\dfrac{32}{3+1}-1^2}=1.114$$

59．换向极极靴宽度 b_{pK}

$$b_{pK}=(0.6\sim0.8)b_K=(0.6\sim0.8)\times8.33$$
$$=(4.998\sim6.664)\quad(\text{厘米})$$

取 $b_{pK}=5$ 厘米。

60．换向极极靴长度 l_{pK}

$$l_{pK}=l_a=32\quad(\text{厘米})$$

61．换向极极身长度 l_{mK}、宽度 b_{mK} 和极身上部宽度 b'_{mK}

$$l_{mK}=l_a=32\quad(\text{厘米})$$

取 $b_{mK}=5$ 厘米；

取 $b'_{mK}=8$ 厘米。

62．漏磁导系数

(1) 槽漏比磁导 λ_s

$$\lambda_s=\frac{h_0}{b_s}+\frac{h_1}{3b_s}=\frac{4.5}{14.4}+\frac{33}{3\times14.4}=1.077$$

(2) 齿顶比磁导 λ_t

$$\lambda_t=0.15\frac{b_{pK}}{k_{\delta K}\delta_{K1}}=0.15\times\frac{5}{1.114\times1.1}=0.612$$

(3) 端部比磁导 λ_E

$$\lambda_E=0.375\frac{1.4\tau}{l_\delta}=0.375\times\frac{1.4\times44.5}{32}=0.73$$

63．电刷覆盖的换向片数 β 及其计算值 β_j

$$\beta=\frac{b_b}{t_K}=\frac{2.7}{0.768}=3.52$$

$$\beta_j=\frac{b_b-\beta_i}{t_K}+\left(1-\frac{a_L}{p}\right)=\frac{2.7-0.08}{0.768}+\left(1-\frac{3}{3}\right)=3.41$$

式中 β_i——换向片间云母片的厚度，取 $\beta_i=0.08$ 厘米。

64．互感短矩系数 k_β

按图 4-8 查得 $k_\beta=7.5$。

65．平均漏磁导系数 ξ

$$\xi=0.4\pi\left[\frac{k_\beta}{2\beta_j}(\lambda_s+\lambda_t)\frac{l_{Fe}}{l_\delta}+\lambda_E\right]$$

$$=0.4\pi\left[\frac{7.5}{2\times3.41}\times(1.077+0.612)\times\frac{29}{32}+0.73\right]$$

$$=3.04$$

66．电抗电动势 e_r

$$e_r=2W_av_aAl_\delta\xi\times10^{-6}$$

$$=2\times1\times44.5\times490\times32\times3.04\times10^{-6}=4.24\quad(\text{伏})$$

67．换向极极数 $2p_K$

$$2p_K=2p=6$$

68．换向极气隙磁密 $B_{\delta K}$

$$B_{\delta K}=A\xi+\frac{a_L\Delta U}{2pW_a v_a l_\delta \beta}\times 10^6$$

$$=390\times 3.04+\frac{3\times 0.75}{2\times 3\times 1\times 44.5\times 32\times 3.52}\times 10^6$$

$$=1565 \quad (高斯)$$

其中取 $\Delta U_b=0.75$ 伏。

69．额定时换向极气隙磁通 Φ_K

$$\Phi_K=B_{\delta K}l_{pK}b_K=1565\times 32\times 8.33=0.417\times 10^6 \quad (麦)$$

70．过载时换向极极身最大磁通密度 $B_{mK\max}$

$$B_{mK\max}=\frac{\sigma_K\Phi_K}{0.94b_{mK}l_{pK}}\cdot\frac{I_{a\max}}{I_a}=\frac{2.5\times 0.417\times 10^6}{0.94\times 5\times 32}\times 1.5$$

$$=10400 \text{ 高斯}<14000 \text{ 高斯}$$

其中取 $\sigma_K=2.5, \frac{I_{a\max}}{I_a}=1.5$。

71．产生换向极气隙磁通所需匝数 W_1

$$W_1=\frac{1.1\times 0.8B_{\delta K}k_{\delta K}\delta_{K1}a_K}{I_a}$$

$$=\frac{1.1\times 0.8\times 1565\times 1.114\times 1.1\times 1}{1743}=0.97 \quad (匝)$$

其中换向极绕组并联支路数 a_K 取 1。

72．消除交轴电枢反应所需匝数 W_q

$$W_q=(N_a-2pW_a\beta)\frac{\frac{K}{2p}-|\varepsilon_K|}{4a_LK}a_K$$

$$=\left(\frac{900}{2}-2\times 3\times 1\times 3.52\right)\times\frac{\frac{225}{2\times 3}-1.5}{4\times 3\times 225}\times 1=5.7 \quad (匝)$$

73．第二气隙所需匝数 W_2

暂取 $W_2=1$ 匝，调整第二气隙大小，使换向极绕组匝数凑成整数。

74．换向极第二气隙 δ_{K2}

$$\delta_{K2}=\frac{I_aW_2}{0.8B_{\delta K}\sigma_K a_K}\frac{b'_{mK}}{b_K}$$

$$=\frac{1743\times1}{0.8\times1565\times2.5\times1}\times\frac{8}{8.33}=0.535\quad(厘米)$$

七、补偿绕组及换向极绕组计算

75．补偿绕组每极计算导体数 N'_{pc}

$$N'_{pc}=\frac{a_cb_pA}{I_a}=\frac{1\times31.2\times490}{1743}=8.77$$

取 $N_{pc}=8$。

76．补偿程度 $\chi_p\%$

$$\chi_p\%=\frac{N_{pc}}{N'_{pc}}\times100\%=\frac{8}{8.77}\times100\%=91.2\%$$

77．每极补偿绕组匝数 W_c

$$W_c=\frac{N_{pc}}{2}=\frac{8}{2}=4\quad(匝)$$

78．每极补偿槽数 Z_{pc}

$$Z_{pc}=\frac{N_{pc}}{n_{pc}}=\frac{8}{2}=4\quad(槽)$$

式中 n_{pc}——每槽导体数，取 $n_{pc}=2$。

79．补偿绕组直线部分导线截面 A_{Cuc}

$$A'_{Cuc}=\frac{I_a}{a_cJ'_{pc}}=\frac{1743}{1\times5.2}=335\quad(毫米^2)$$

式中 J'_{pc}——补偿绕组直线部分初选电密，取 $J'_{pc}=5.2$ 安/毫米²。

选用裸铜排扁铜线，$a_c\times b_c=11\times30$ 毫米，$A_{Cuc}=329.1$ 毫米²。

实际电密 $$J_{pc}=\frac{I_a}{A_{Cuc}}=\frac{1743}{329.1}=5.3\quad(安/毫米^2)$$

80．补偿绕组端接部分导线截面 A_{CucE}

$$A'_{CucE}=\frac{I_a}{a_c J'_{cE}}=\frac{1743}{1\times5.3}=329.1\text{毫米}^2$$

式中 J'_{cE}——补偿绕组端接部分初选电密，取 $J'_{cE}=5.3$ 安/毫米²。

选用裸铜排扁铜线，$a_c\times b_c=6.5\times50$ 毫米，$A_{CucE}=324.1$ 毫米²。

实际电密 $J_{cE}=\frac{I_a}{A_{CucE}}=\frac{1743}{324.1}=5.38$ （安/毫米²）

81．补偿槽形尺寸 $b_{sc}\times h_{sc}$

补偿槽形通常作成半闭口形式，其槽口宽度取为2毫米。根据所选导线尺寸及工厂的补偿槽绝缘规范算得

$$b'_{sc}=2a_c+3.2=2\times11+3.2=25.2 \quad (\text{毫米})$$

$$h'_{sc}=b_c+8.1=30+8.1=38.1 \quad (\text{毫米})$$

式中 3.2——槽宽方向绝缘的总厚度；

8.1——槽高方向绝缘的总厚度。

实际槽形取 $b_{sc}\times h_{sc}=27\times38.2$ 毫米。

补偿槽齿距 $t_c=\frac{b_p}{Z_{pc}}=\frac{31.2}{4}=7.8$ （厘米）

82．在补偿槽的 $\frac{1}{3}$ 高处极弧宽 $b_{p1/3}$

$$b_{p1/3}=b_p\frac{D_a+2\delta+\frac{2}{3}h_{sc}}{D_a+2\delta}$$

$$=31.2\times\frac{85+2\times0.5+\frac{2}{3}\times3.82}{85+2\times0.5}=32.2 \quad (\text{厘米})$$

83．在补偿槽的 $\frac{1}{3}$ 高处齿的总面积 $A_{c1/3}$

$$A_{c1/3}=0.94l_m(b_{p1/3}-Z_{pc}b_{sc})$$

$$=0.94\times32(32.2-4\times2.7)=643.7 \quad (厘米^2)$$

84. 额定时补偿齿部的磁通密度 $B'_{c1/3}$

$$B'_{c1/3}=\frac{\Phi'_N}{A_{c1/3}}=\frac{9.06\times10^6}{643.7}=14080 \quad (高斯)$$

85. 补偿绕组直线部分总长 L_{pc}

$$L_{pc}=l'_{pc}N_{pc}2p=60.8\times8\times2\times3=2920 \quad (厘米)$$

式中 l'_{pc}——补偿绕组每根直线部分长度估算值，待图纸完成后再进行校正。

86. 补偿绕组端接部分总长 L_{pcE}

$$L'_{pcE}=(1.05\sim1.25)\tau N_{pc}\times2p$$

$$=(1.05\sim1.25)\times44.5\times8\times2\times3$$

$$=(2240\sim2670) \quad (厘米)$$

取 $L_{pcE}=2500$ 厘米。

87. 补偿绕组电阻 $R_{c75^\circ C}$

$$R_{c75^\circ C}=\frac{L_{pc}\rho}{A_{Cuc}a_c^2}+\frac{L_{pcE}\rho}{A_{CucE}a_c^2}$$

$$=\frac{2900\times2.17\times10^{-4}}{329.1\times1^2}+\frac{2500\times2.17\times10^{-4}}{324.1\times1^2}$$

$$=0.0036 \quad (欧)$$

88. 补偿绕组直线部分铜重 G_{Cuc}

$$G_{Cuc}=8.9L_{pc}A_{Cuc}\times10^{-5}=8.9\times2900\times329.1\times10^{-5}$$

$$=85.5 \quad (公斤)$$

89. 补偿绕组端接部分铜重 G_{CucE}

$$G_{CucE}=8.9L_{pcE}A_{CucE}\times10^{-5}$$

$$=8.9\times2500\times324.1\times10^{-5}=72 \quad (公斤)$$

90. 换向极绕组每极匝数 W_K

$$W_K=W_1+W_q+W_2-W_c=0.97+5.7+1-4=3.67 \quad (匝)$$

取 $W_K=3$ 匝。

91. 估算换向极绕组导线截面 A'_{A1K}

$$A'_{A1K}=\frac{I_a}{J'_{A1K}a_K}=\frac{1743}{3\times1}=581 \quad (毫米^2)$$

式中 J'_{A1K}——换向极绕组导线电密初选值，取 $J'_{A1K}=3$ 安/毫米²。

裸铝线线规选为

$$n_{A1K}\sim a_{A1K}\times b_{A1K}=2\sim11\times28 \quad (毫米)$$

实际导线截面 $A_{A1K}=612.4$ （毫米²）

实际换向极绕组电密

$$J_{A1K}=\frac{I_a}{A_{A1K}a_K}=\frac{1743}{612.4\times1}=2.85 \quad (安/毫米^2)$$

92. 换向极绕组尺寸

(1) 内框尺寸 b、a

$$b=b_{mK}+2\times0.3=5+0.6=5.6 \quad (厘米)$$

$$a=l_{mK}+b-2\times0.8=32+5.6-1.6=36 \quad (厘米)$$

(2) 外框尺寸 B、A

$$B=b+2\times b_{A1K}=5.6+2\times2.8=11.2 \quad (厘米)$$

$$A=a+2\times b_{A1K}=36+2\times2.8=41.6 \quad (厘米)$$

(3) 绕组高度 h_{WK}

$$\begin{aligned}h_{WK}&=1.05(W_K+1)n_{A1K}a_{A1K}+(W_K-1)\times0.04+0.32\\&=1.05(3+1)\times2\times1.1+(3-1)\times0.04+0.32\\&=9.64 \quad (厘米)\end{aligned}$$

93. 换向极绕组平均匝长 l_{Kav}

$$\begin{aligned}l_{Kav}&=2(l_{mK}-1.6)+\pi(b+b_{A1K})\\&=2(32-1.6)+\pi(5.6+2.8)=87.2 \quad (厘米)\end{aligned}$$

94．换向极绕组电阻 $R_{K75°C}$

$$R_{K75°C}=\frac{l_{Kav}W_K\times 2p_K}{A_{AlK}a_K^2}\times 3.46\times 10^{-4}$$

$$=\frac{87.2\times 3\times 2\times 3}{612.4\times 1^2}\times 3.46\times 10^{-4}$$

$$=0.000888 \quad (\text{欧})$$

95．换向极绕组铝重 G_{AlK}

$$G_{AlK}=l_{Kav}W_K\times 2p_K A_{AlK}\times 2.7\times 10^{-5}$$

$$=87.2\times 3\times 2\times 3\times 612.4\times 2.7\times 10^{-5}$$

$$=25.95 \quad (\text{公斤})$$

八、磁路计算

96．电枢电路总电阻 ΣR

$$\Sigma R=R_{a75°C}+R_{K75°C}+R_{c75°C}$$

$$=0.0056+0.000888+0.0036$$

$$=0.01009 \quad (\text{欧})$$

97．满载时额定电动势 E_N

$$E_N=U_N+I_a\Sigma R+2$$

$$=660+1743\times 0.01009+2=679.6 \quad (\text{伏})$$

与前估算值 E_a 值相差不大于0.5%。

98．满载时每极磁通 Φ_N

$$\Phi_N=\frac{60E_N a\times 10^8}{pN_a n_N}=\frac{60\times 679.6\times 6\times 10^8}{3\times 900\times 1000}$$

$$=9.06\times 10^6 \quad (\text{麦})$$

99．实际气隙磁通密度 B_δ

$$B_\delta=\frac{\Phi_N}{b'_p l_\delta}=\frac{9.06\times 10^6}{32.2\times 32}=8793 \quad (\text{高斯})$$

100．气隙系数 k_δ

$$k_\delta=\frac{(5\delta+b_s)t_a}{(5\delta+b_s)t_a-b_s^2}\frac{(5\delta+b_{0c})t_c}{(5\delta+b_{0c})t_c-b_0^2}$$

$$\times\frac{(5\delta+b_v)\dfrac{l_a}{n_{vr}+1}}{(5\delta+b_v)\dfrac{l_a}{n_{vr}+1}-b_v^2}$$

$$=\frac{(5\times5+14.4)\times35.6}{(5\times5+14.4)\times35.6-14.4^2}\times\frac{(5\times5+2)\times78}{(5\times5+2)\times78-2^2}$$

$$\times\frac{(5\times5+10)\dfrac{320}{3+1}}{(5\times5+10)\dfrac{320}{3+1}-10^2}=1.219$$

101．每极气隙磁动势 F_δ

$$F_\delta=0.8B_\delta\delta k_\delta=0.8\times8793\times0.5\times1.219$$
$$=4287.5\quad(安)$$

102．电枢 $\frac{1}{3}$ 齿高处的齿宽 $b_{ta1/3}$

$$b_{ta1/3}=\frac{\pi\left(D_a-\dfrac{4}{3}h_s\right)}{Z}-b_s$$

$$=\frac{\pi\left(85-\dfrac{4}{3}\times3.75\right)}{75}-1.44=1.91\quad(厘米)$$

103．电枢 $\frac{1}{3}$ 齿高处的磁通密度 $B_{ta1/3}$

$$B_{ta1/3}=\frac{B_\delta t_a l_\delta}{k_{Fea}b_{tb1/3}l_{Fe}}=\frac{8793\times3.56\times32}{0.93\times1.91\times29}=19450\quad(高斯)$$

104．视在齿根磁密 B_{ta3}

$$B_{ta3}=\frac{b_{ta1/3}}{b_{ta3}}B_{ta1/3}=\frac{1.91}{1.805}\times19450$$
$$=20580\ 高斯<24500\ 高斯$$

105. 齿部校正系数 k_s

$$k_s=\frac{b_s l_\delta}{k_{Fea} b_{ta1/3} l_{Fe}}=\frac{1.44\times32}{0.93\times1.91\times29}=0.895$$

由图 5-15 查得 $H_{ta1/3}=191$ 安/厘米，$B_{ta1/3}=19200$ 高斯。

106. 每极齿部磁动势 F_{ta}

$$F_{ta}=L_{ta}H_{ta1/3}=3.75\times191=716\text{ 安}$$

107. 电枢轭部磁通密度 B_{ja}

$$B_{ja}=\frac{\Phi_N}{2k_{Fea}h_{ja}l_{Fe}}=\frac{9.06\times10^6}{2\times0.93\times14.1\times29}=11912\quad(\text{高斯})$$

由表 II-1 查得：$H_{ja}=6$ 安/厘米。

108. 电枢轭部磁路长度 L_{ja}

$$L_{ja}=\frac{\pi}{4p}(D_{ia}+h_{ja})=\frac{\pi}{4\times3}(49.3+14.1)=16.6\quad(\text{厘米})$$

109. 每极电枢轭部磁动势 F_{ja}

$$F_{ja}=L_{ja}H_{ja}=16.6\times6=99.6\quad(\text{安})$$

110. 主磁极磁通 Φ_m

$$\Phi_m=\sigma\Phi_N=1.15\times9.06\times10^6=10.4\times10^6\quad(\text{麦})$$

111. 主极铁心磁通密度 B_m

$$B_m=\frac{\Phi_m}{k_{Fem}b_m l_m}=\frac{10.4\times10^6}{0.94\times24\times32}=14400\quad(\text{高斯})$$

由表 II-3 查得：$H_m=17.05$ 安/厘米。

112. 每极主极磁动势 F_m

$$F_m=(h_m-h_{sc})H_m=(22-3.82)\times17.05=310\quad(\text{安})$$

113. 补偿齿部磁密 $B_{c1/3}$

$$B_{c1/3}=\frac{\Phi_N}{A_{c1/3}}=\frac{10.4\times10^6}{643.7}=16160\quad(\text{高斯})$$

由表 II-3 查得：$H_{c1/3}=44$ 安/厘米。

114. 补偿齿部磁动势 $F_{c1/3}$

$$F_{c1/3}=h_{sc}H_{c1/3}=3.82\times44=168 \quad (\text{安})$$

115. 机座轭部磁密 B_j

$$B_j=\frac{\Phi_m}{2h_jl_j}=\frac{10.4\times10^6}{2\times8\times62}=10480 \quad (\text{高斯})$$

由表 II–4 查得：$H_j=10$ 安/厘米。

116. 机座轭部磁路长度 L_j

$$L_j=\frac{\pi(D_{ij}+h_j)}{4p}=\frac{\pi(130+8)}{4\times3}=36.1 \quad (\text{厘米})$$

117. 机座轭部每极磁动势 F_j

$$F_j=L_jH_j=36.1\times10=361 \quad (\text{安})$$

118. 每极总的磁势 ΣF

$$\begin{aligned}\Sigma F&=F_\delta+F_{ta}+F_{ja}+F_m+F_{c1/3}+F_j\\&=4287.5+716+99.6+310+168+361\\&=5942.1 \quad (\text{安})\end{aligned}$$

九、空载特性曲线计算

见表 8–2。

十、励磁绕组

119. 他励励磁绕组导线截面初选值 A'_{Alf}

$$\begin{aligned}A'_{Alf}&=\frac{2pl'_{fav}F_f\rho_fk_f}{U_f}\\&=\frac{2\times3\times128\times5942.1\times3.46\times10^{-4}\times1.25}{220}\\&=8.97 \quad (\text{毫米}^2)\end{aligned}$$

式中 k_f——励磁余量，取 $k_f=1.25$；

l'_{fav}——他励线圈估算平均匝长，初步定为 128 厘米，待图纸完成后再进行校正。

选高强度聚酯漆包铝线 QZLB，

表 8-2 空载特性曲线表

Φ/Φ_N	0.5	0.7	0.9	1.0	1.05	1.1	1.15
E_N	340	476	612	680	714	748	782
Φ_N	4.53 $\times 10^6$	6.342 $\times 10^6$	8.154 $\times 10^6$	9.06 $\times 10^6$	9.513 $\times 10^6$	9.966 $\times 10^6$	10.419 $\times 10^6$
B_δ	4396.5	6155.1	7913.7	8793	9232.7	9672.3	10112
F_δ	2143.8	3001	3858.8	4287.5	4502	4716	4930.6
$B_{ta1/3}$	9722.5	13612	17500	19450	20417	21390	22362
$H_{ta1/3}$	3.42	10	82	191	286	469	784
F_{ta}	12.8	37.5	307.5	716	1072.5	1758.8	2940
B_{ja}	5956	8338.4	10720	11912	12508	13103	13699
H_{ja}	1.53	2.52	4.3	6	7.05	8.4	10.3
F_{ja}	25.4	41.8	71.4	99.6	117	139.5	171
Φ_m	5.2 $\times 10^6$	7.28 $\times 10^6$	9.36 $\times 10^6$	10.4 $\times 10^6$	10.92 $\times 10^6$	11.44 $\times 10^6$	11.96 $\times 10^6$
B_m	7200	10080	12960	14400	15120	15840	16560
H_m	3.57	5.8	10.65	17.05	24.3	36.8	54.5
F_m	65	105.4	193.6	310	442	669	990
B_j	5240	7339	9436	10480	11008	11532	12057
H_j	4.21	6.17	8.53	10	10.9	11.93	13.05
F_j	152	223	308	361	394	431	471
$B_{c1/3}$	8080	11310	14540	16160	16960	17780	18580
$H_{c1/3}$	4.1	7.37	18	44	69.4	107	154
$F_{c1/3}$	15.7	28	69	168	265	418	588
ΣF	2414.7	2437	4808	5942.1	6792.5	8132.3	10091

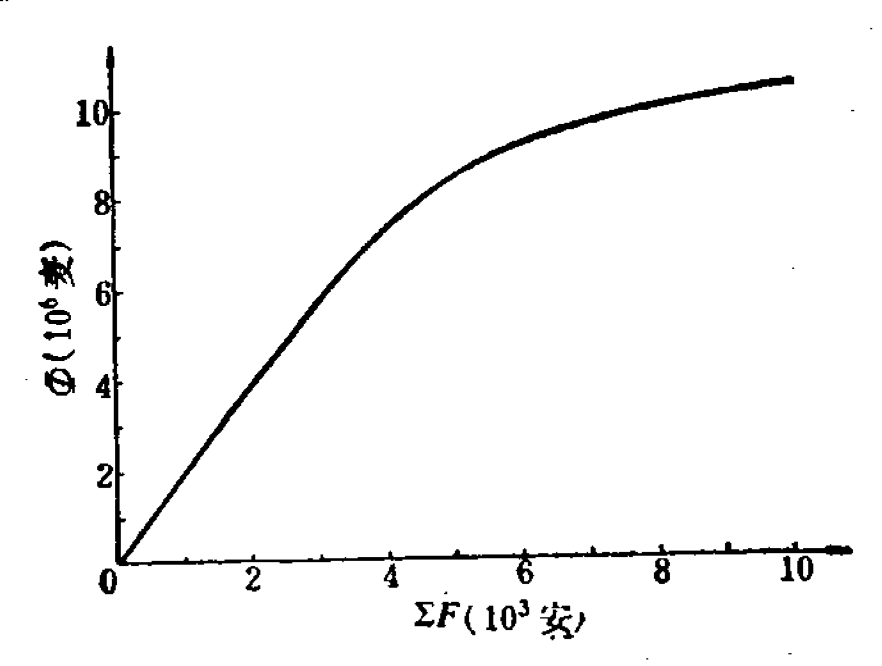


图 8-4 1150 千瓦直流发电机空载特性曲线

$$\frac{a_{Alc}\times b_{Alc}}{a_{Al}\times b_{Al}}=\frac{1.25\times7.4}{1.36\times7.55}\quad(毫米)$$

$$A_{Alf}=9.04\quad(毫米^2)$$

其中　$a_{Alc}\times b_{Alc}$ 为裸铝线尺寸，$a_{Al}\times b_{Al}$ 为绝缘铝线尺寸。

120．励磁绕组每极匝数 W_f

$$W_f'=\frac{F_f}{A_{Alf}J'_{Alf}}=\frac{5942.1}{9.04\times1.95}=337\quad(匝)$$

取 $W_f=336$ 匝。

其中　J'_{Alf}——励磁绕组初选电密值，取 $J'_{Alf}=1.95$安/毫米²。

121．额定时总励磁电流 I_{fN}

$$I_{fN}=\frac{F_f}{W_f}=\frac{5942.1}{336}=17.7\quad(安)$$

122．励磁绕组实际电流密度 J_{Alf}

$$J_{Alf}=\frac{I_{fN}}{A_{Alf}a_f}=\frac{17.7}{9.04\times1}=1.96\quad(安/毫米^2)$$

式中　a_f——励磁绕组并联支路数，取 $a_f=1$。

123．励磁绕组的排列及尺寸计算

每极励磁绕组分成两只，每只排 24 层，每层 7 匝。

(1) 每只绕组高度 h_{Wf}

$$h_{Wf}=b_{Al}(n+0.5)+1=7.55(7+0.5)+1$$
$$=57.6\text{毫米}=5.76\quad(厘米)$$

式中　n——线圈每层的匝数。

(2) 绕组宽度 C

$$C=a_{Al}m\times1.1+1=1.36\times24\times1.1+1$$
$$=36.9\text{毫米}=3.69\quad(厘米)$$

式中　m——线圈总层数。

(3) 内框尺寸 b、a

$$b=b_m+2\times0.3=24+0.6=24.6\quad(厘米)$$

$$a = l_m + 2\times0.3 = 32 + 0.6 = 32.6 \quad (厘米)$$

(4) 外框尺寸 B、A

$$B = b + 2C = 24.6 + 2\times3.69 = 31.98 \quad (厘米)$$

$$A = a + 2C = 32.6 + 2\times3.69 = 39.98 \quad (厘米)$$

(5) 两只绕组总高度 H_{Wf}

$$H_{Wf} = 2\times h_{Wf} + 3\times0.6 = 2\times5.76 + 3\times0.6 = 13.32 \quad (厘米)$$

式中 0.6——为绕组间和绕组上、下端的胶木垫块厚度。

124. 励磁绕组实际平均匝长 l_{fav}

$$l_{fav} = 2(b+a) + \pi C = 2(24.6+32.6) + \pi\times3.59 = 125.7 \quad (厘米)$$

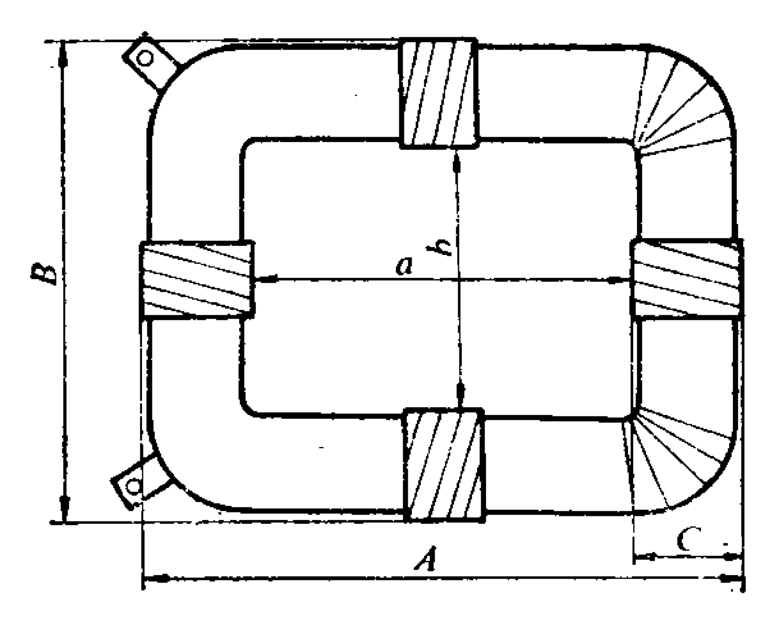


图 8-5 主极线圈尺寸

125. 励磁绕组电阻 $R_{f75°C}$

$$R_{f75°C} = \frac{2pW_f\rho_f l_{fav}}{A_{Alf}a_f^2}$$

$$= \frac{2\times3\times336\times3.46\times10^{-4}\times125.7}{9.04\times1^2} = 9.7 \quad (欧)$$

126. 励磁绕组在 120°C 时电阻 $R_{f120°C}$

$$R_{f120°C} = 1.145\times R_{f75°C} = 1.145\times9.7 = 11.1 \quad (欧)$$

127. 最大励磁电流 $I_{f\max}$

$$I_{f\max} = \frac{U_{fN}}{R_{f120°C}} = \frac{220}{11.1} = 19.85 \quad (安)$$

128. 励磁余量 k_f

$$k_f = \frac{I_{f\max}}{I_{fN}} = \frac{19.85}{17.7} = 1.12$$

129．励磁功率 P_{fN}

$$P_{fN}=U_{fN}I_{fN}\times10^{-3}=220\times17.7\times10^{-3}=3.89\quad（千瓦）$$

130．励磁绕组铝重 $G_{\mathrm{Al}f}$

$$\begin{aligned}G_{\mathrm{Al}f}&=l_{fav}W_f\times2pA_{\mathrm{Al}f}\times2.7\times10^{-5}\\&=125.7\times336\times2\times3\times9.04\times2.7\times10^{-5}\\&=62\quad（公斤）\end{aligned}$$

十一、损耗及效率计算

131．电枢绕组铜耗 $P_{\mathrm{Cu}a}$

$$P_{\mathrm{Cu}a}=I_a^2R_{a75^\circ\mathrm{C}}=1743^2\times0.0056=17000\quad（瓦）$$

132．换向极绕组铝耗 $P_{\mathrm{Al}K}$

$$P_{\mathrm{Al}K}=I_a^2R_{K75^\circ\mathrm{C}}=1743^2\times0.000888=2700\quad（瓦）$$

133．补偿绕组铜耗 $P_{\mathrm{Cu}c}$

$$P_{\mathrm{Cu}c}=I_a^2R_{c75^\circ\mathrm{C}}=1743^2\times0.0036=10940\quad（瓦）$$

134．励磁绕组铝耗 $P_{\mathrm{Al}f}$

$$P_{\mathrm{Al}f}=I_{fN}^2R_{f75^\circ\mathrm{C}}=17.7^2\times9.7=3040\quad（瓦）$$

135．电枢铁心交变磁化频率 f

$$f=\frac{pn_N}{60}=\frac{3\times1000}{60}=50\quad（赫兹）$$

136．电枢轭部重量 $G_{\mathrm{Fe}ja}$

$$\begin{aligned}G_{\mathrm{Fe}ja}&=\gamma_{\mathrm{Fe}}\times4pL_{ja}l_{\mathrm{Fe}}h_{ja}k_{\mathrm{Fe}a}\\&=7.8\times10^{-3}\times4\times3\times16.6\times29\times14.1\times0.93\\&=590\quad（公斤）\end{aligned}$$

137．电枢齿部重量 $G_{\mathrm{Fe}ta}$

$$\begin{aligned}G_{\mathrm{Fe}ta}&=\gamma_{\mathrm{Fe}}Zb_{ta1/2}h_sl_{\mathrm{Fe}}k_{\mathrm{Fe}a}\\&=7.8\times10^{-3}\times75\times1.96\times3.75\times29\times0.93\\&=116\quad（公斤）\end{aligned}$$

其中 $b_{ta1/2}=\frac{\pi(D_a-h_s)}{Z}-b_s=\frac{\pi(85-3.75)}{75}-1.44$

$=1.96$ 厘米

138. 电枢轭部铁耗 P_{Feja}

$$P_{Feja}=k_{ja}p_{10/50}\left(\frac{B_{ja}}{10000}\right)^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}G_{Feja}$$

$$=1.5\times2.1\times\left(\frac{11912}{10000}\right)^2\left(\frac{50}{50}\right)^{1.3}\times590=2640 \quad (瓦)$$

139. 电枢齿部铁耗 P_{Feta}

$$P_{Feta}=k_{ta}p_{10/50}\left(\frac{B_{ta1/2}}{10000}\right)^2\left(\frac{f}{50}\right)^{1.3}G_{Fe.a}$$

$$=2\times2.1\times\left(\frac{18750}{10000}\right)^2\left(\frac{50}{50}\right)^{1.3}\times116=1710 \quad (瓦)$$

其中 $B'_{ta1/2}=B_\delta\frac{t_al_a}{0.93b_{ta1/2}l_{Fe}}=8793\times\frac{3.56\times32}{0.93\times1.96\times29}$

$=18950$ 高斯

$B_{ta1/2}=18750$ （高斯）。

140. 比值 $\frac{b_s}{\delta}$

$$\frac{b_s}{\delta}=\frac{14.4}{5}=2.88$$

由图 6–5 查得 $\beta_0=0.22$。

141. 磁极表面磁感应强度 B_0

$B_0=\beta_0B_\delta k_\delta=0.22\times8793\times1.219=2360$ （高斯）

142. 磁极表面单位面积损耗 P_{Fep}

$$P_{Fep}=K_0\left(\frac{Zn_N}{10^4}\right)^{1.5}\left(\frac{B_0t_a}{10^3}\right)^2$$

$$=4\left(\frac{75\times1000}{10^4}\right)^{1.5}\left(\frac{2360\times3.56}{10^3}\right)^2=5780 \quad (瓦/米^2)$$

143. 磁极表面损耗 P_{Fef}

$$P_{\text{Fe}f}=2pb_pl_pk_{\text{Fe}m}p_{\text{Fe}p}\times10^{-4}$$

$$=2\times3\times31.2\times32\times0.94\times5780\times10^{-4}=3260\quad(\text{瓦})$$

144. 电枢铁耗 P_{Fe}

$$P_{\text{Fe}}=P_{\text{Fe}ja}+P_{\text{Fe}ta}+P_{\text{Fe}f}=2640+1710+3260=7610\quad(\text{瓦})$$

145. 电刷摩擦损耗 P_{fb}

$$P_{fb}=9.81k_{fb}F_bA_bv_K=0.4\times n_bb_bl_bN_b\times2pv_K$$

$$=0.4\times2\times1.25\times3.2\times8\times2\times3\times28.8=4430\quad(\text{瓦})$$

其中 $9.81k_{fb}F_b=9.81\times0.2\times0.204=0.4$。

146. 电刷接触电损耗 P_b

$$P_b=\Delta U_bI_a=2\times1743=3486\quad(\text{瓦})$$

147. 风摩损耗 $P_{fv}+P_{fbr}$

由图 6-7 查得:

$$P_{fv}+P_{fbr}\doteq1.1P_N=1.1\times11500=12650\quad(\text{瓦})$$

148. 附加损耗 P_{ad}

$$P_{ad}=0.005U_NI_N=0.005\times660\times1743=5750\quad(\text{瓦})$$

149. 空载损耗

$$P_0=P_{\text{Fe}}+P_{fb}+P_{fv}+P_{fbr}$$

$$=7610+4430+12650=24690\quad(\text{瓦})$$

150. 总损耗 ΣP

$$\Sigma P=P_{\text{Cu}a}+P_{\text{Cu}c}+P_{\text{Al}K}+P_b+P_0+P_{ad}$$

$$=17000+10940+2700+3486+24690+5750$$

$$=64566\quad(\text{瓦})$$

151. 效率 η

$$\eta=\frac{P_N}{P_N+\Sigma P}\times100\%$$

$$=\frac{1150\times10^3}{1150\times10^3+64.566\times10^3}\times100\%=94.68\%$$

第九章　用电子计算机进行电磁计算

9-1　程序的一般介绍

过去，电机的电磁方案用手工进行计算，计算工作量很大，而且容易出错。当前，这种计算完全可以由电子计算机来进行，既快又精确。

用电子计算机进行电磁计算，必须预先编制好一份适用于电子计算机的程序。这种程序与用于手工计算的程序有如下区别。

(1) 手工计算用的程序在设计者使用时具有一定的灵活性，同一份程序可以适应不同的计算要求，只要在计算过程中作适当处理即可。而机器计算用的程序是按照程序本身严格的逻辑关系，由电子计算机自动进行计算的，因此程序的一切功能和处理方法都必须在编制程序时完全考虑好。要使同一份程序能适应不同的计算要求，势必使程序庞大和使用不便，因此，大型电机和小型电机的计算程序最好分开编制，用于确定主要尺寸的计算程序(称为初步计算程序)和主要尺寸为已知的电磁计算程序(称为详细计算程序)也要分开编制。

(2) 手工计算时，为了减轻计算工作量，有些复杂的计算方法在满足工程要求的前提下作了简化，有些制成图表。此外，对于一些需要事先假定、而在后续运算中才能确定的量，如并励电流、效率、压降系数等，往往根据生产经验制成一些图表，作为事先假定时的参考，以便使假定值与计算值不致相差过大，减少返工。而用电子计算机计算时，可以保留那些复

杂的计算方法，并采用有较高精度的数值计算法。对于上述需要事先假定的量，则可以通过多次迭代修正(即用前一次循环计算后的计算值修正后一次循环计算前的假定值)，使假定值与计算值尽量接近，以便提高计算精度。这时，最初假定值可以是比较任意的。

(3) 手工计算时不必在程序中考虑选择线规和查取图表的方法，也不存在已知数据的输入和计算结果的输出等问题，而在机器计算用的程序中，这些问题都必须考虑。

机器计算用的直流电机电磁计算程序的类型，根据计算的目的和要求，可分为初步计算程序和详细计算程序两类。初步计算程序的功能是：从电机的技术条件出发，以电磁负荷、热负荷、换向参数等是否合理为判别条件，来选择合适的主要尺寸。详细计算程序的功能是：从电机的技术条件和选定的主要尺寸出发，计算电机的各部分尺寸和所有绕组数据以及参数、特性、损耗、效率等。对于大、中型电机，由于电机的成本较高，而且大多是单个设计，电机的极数和电枢绕组型式的选择范围也较大，因此进行初步计算是很有必要的。通过初步计算，在多个方案中进行比较，根据技术经济性确定主要尺寸后，再作详细计算。而对于小型电机，由于多数是在系列产品的基础上发展派生规格，因此主要尺寸容易确定，往往可直接作详细计算。小型电机电磁计算的详细计算一般就直接称为电磁计算。

机器计算用程序的结构，从使用程序的角度来讲，可分成数据输入、方案计算和结果输出三部分。下面对小型电机的电磁计算程序和大型电机的初步计算程序分别加以具体介绍。

1. 小型电机电磁计算程序的结构

输入数据一般分成两部分。一部分是表格、曲线的数据，

如线规表、磁化曲线等，这些数据对于程序起备查作用。另一部分是计算对象的已知数据，包括电机的技术条件和电枢、机座、主磁极、换向极和换向器的一些主要尺寸；如果电枢槽型是事先确定好的，那末还要包括槽型尺寸，否则，槽型尺寸就由程序计算确定，这种计算通常称为开槽计算。计算对象的已知数据除上述内容外，通常还包括一些信息量。信息量是为扩大程序使用范围而设置的，某一个信息量表示某一方面的计算功能。例如，设置某一个信息量，当它取值为1时，程序中通过有关的逻辑判别，就将计算对象作为电动机计算，当它取值为2时，则作为发电机计算。设置多个信息量，可使程序具有较大的通用性，对于具有不同运行方式、不同绕组型式、不同槽型、不同导线类型以及不同材料等的电机都可以用一个程序进行计算。

方案计算部分是程序的主体，它包括电枢绕组计算、换向及换向极绕组计算、磁路及励磁绕组计算以及参数、特性、损耗、效率等计算。如果电枢槽型为未知，则还包括开槽计算。为了适应电子计算机自动计算的需要并提高计算精度，在方案计算部分要用到一些数值计算法。如查取曲线可用插值法，求取负载时每极主磁通可用数值积分法，计算齿饱和磁通向槽中扩散的效应可用对分法等。除采用这些常用的数值计算法外，对于电枢的开槽、励磁绕组的计算等还需作一些专门考虑。所有这些处理方法，详见9-2节。在方案计算中，有些量(如并励电流、效率、压降系数)可通过多次迭代修正，来提高其计算精度。

电磁计算的结果输出通常包括电机的各部分的尺寸和数据以及电机的参数、特性、损耗、效率等。输出量的多少和输出格式的安排可视需要而定。

机器计算用的电磁计算程序还可以做到多方案计算，以便于进行比较。一般在选择电磁负荷时，磁负荷是比较固定的，而电负荷往往有一定的选择范围。因此对计算对象给出已知数据时，可使电枢长度在一定范围内变化。这样，在固定了磁负荷以后，电负荷就自动随电枢长度而变化，电枢长度的下限对应电负荷的上限；电枢长度的上限对应电负荷的下限。计算时，电枢长度从下限起每增加一个增量(如 0.5 厘米)计算一个方案，直到达到上限为止。这样便可得到多个方案，为方案选择提供了条件。

下面，以图 9-1 所示逻辑框图表明小型直流电机的一种电磁计算程序的结构。

2．大型电机初步计算程序的结构

初步计算程序的输入数据较少，仅包括线规表，电机的技术条件以及电机类型、电枢绕组型式、电枢直径和换向器直径。

方案计算部分主要采用淘汰法。以电磁负荷、热负荷和换向参数等作为判据，每一个作为判据的参数都给出一个合格的范围（如大电机电负荷的合格范围取350～600 安/厘米)，凡参数计算结果落在合格范围内，方案就被保留，否则被淘汰。因此每经过一个判据甄别一次，有一些方案被保留下来，有一些方案中途淘汰。最后保留下来的所有方案则都是合格的。

结果输出的内容是所有合格方案的主要尺寸以及电磁负荷、热负荷和换向参数等。

如果经过一次计算尚未得到理想方案，可改变电枢绕组型式或电枢、换向器直径重行计算。

图 9-2 是大型直流电机一种初步计算程序的逻辑框图。

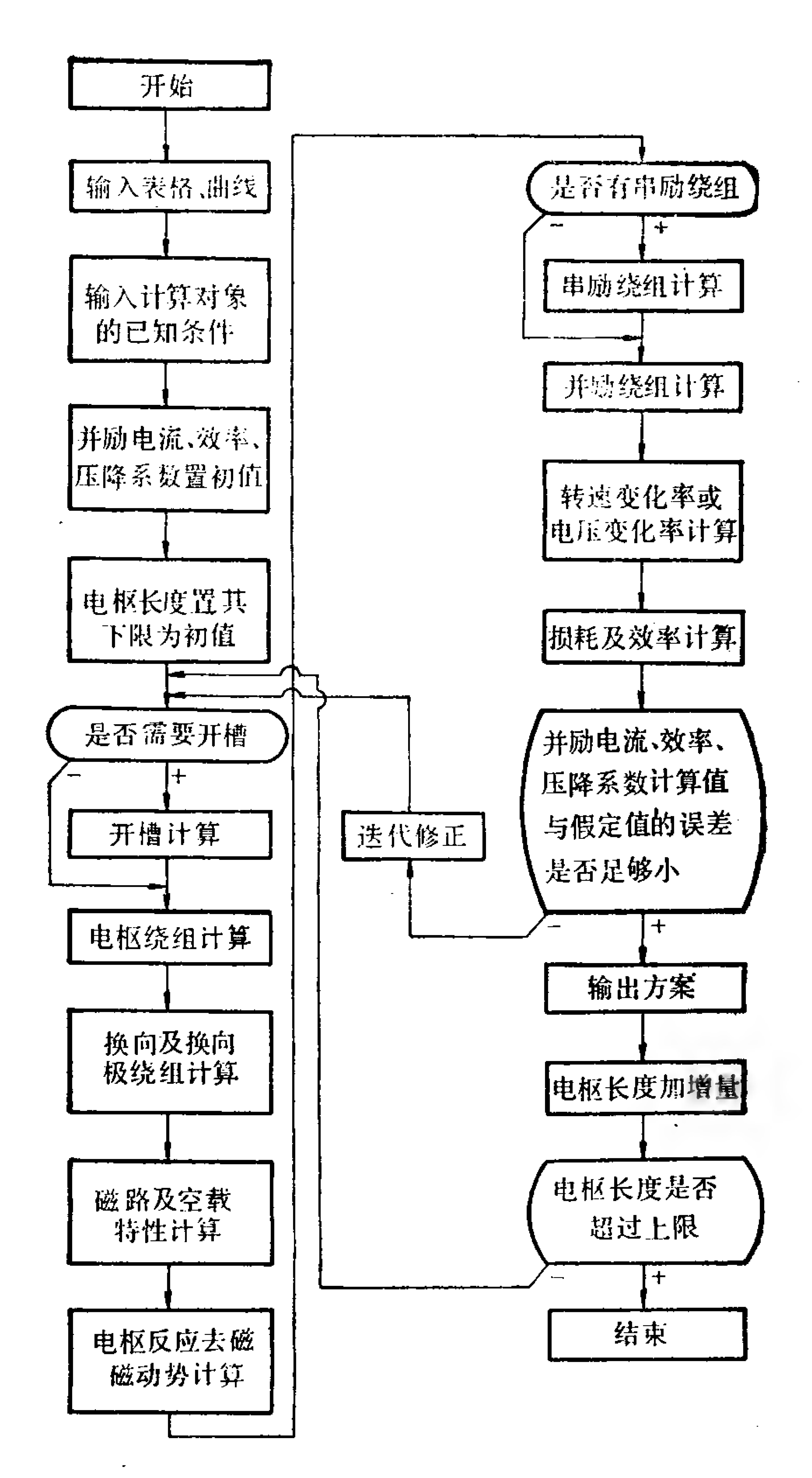


图 9-1 小型直流电机电磁计算程序逻辑框图

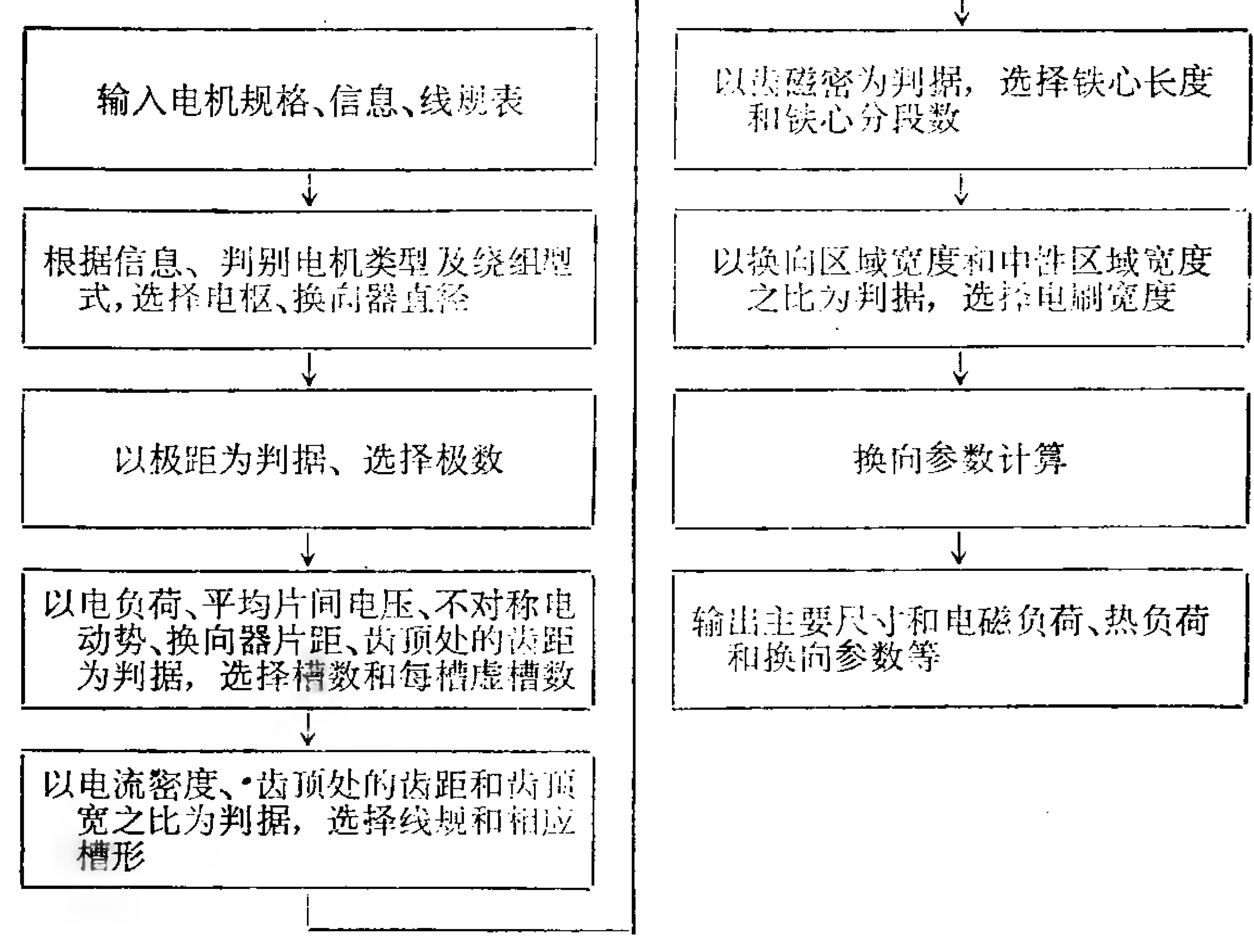


图 9-2　大型直流电机初步计算程序逻辑框图

9-2　编制程序的一些处理方法

在上节中已提到，为了适应电子计算机自动计算的需要并提高计算精度，采用一些数值计算法，如插值法、数值积分法、对分法等。此外，对于电枢的开槽、励磁绕组的计算等还需要作一些专门的考虑。以下对这些处理方法逐一加以介绍。

一、插值法

在程序中需要查取的曲线（如磁化曲线）大多是实测曲线或经验曲线，不能直接用数学解析式来表示。因此只能为程序提供曲线上若干点的自变量（称为插值节点）及其对应的函数值。这些数据也就是上节中提到的输入曲线所包含的内容。

插值节点是有限的，当需要查取的那一点不在插值节点上时，通常采用插值法。其原理如下：在需要查取的那一点（称为插值点）的邻近取两个插值节点或三个插值节点。取两个插值节点时，由它们及其函数值构成线性函数；取三个插值节点时，由它们及其函数值构成抛物线函数。这种函数称为插值函数。然后由插值函数计算插值点的函数值，由此来近似代替查取曲线上某一点的值。这种计算称为插值。由线性函数进行的插值称为线性插值或二点插值，由抛物线函数进行的插值则称为抛物线插值或三点插值。一般来说，只要插值节点配置适当，抛物线插值函数要比线性插值函数更逼近真实曲线，因此三点插值比二点插值具有较高的精度。当然，还可以由更多的插值节点及其函数值构成更高次的插值函数，但比较复杂，而且插值精度也不一定能进一步提高，因此很少采用。视插值函数是一元的还是多元的，又可分为一元插值和多元插值。以下介绍常用的一元三点插值的方法。

设在 X 坐标上有 n 个插值节点 x_1、$\cdots$、x_n，其对应的函数值为 y_1、$\cdots$、y_n。首先根据插值点 x 的位置，选择其最邻近的三个插值节点 x_k，x_{k+1}、x_{k+2}，其对应的函数值为 y_k、y_{k+1}、y_{k+2}。k 的决定可用下法：当 $x<x_1$ 时，取 $k=1$；当 $x\geqslant x_{n-1}$ 时，取 $k=n-2$；当 $x_i\leqslant x<x_{i+1}$ 时（i 为 $1\sim(n-2)$ 范围中的任一整数），取 $k=i$。然后由 x_k、x_{k+1}、x_{k+2} 和 y_k、y_{k+1}、y_{k+2} 构成抛物线插值函数并进行插值运算。采用拉格朗日插值公式时，抛物线插值函数的形式为

$$y=\frac{(x-x_{k+1})(x-x_{k+2})}{(x_k-x_{k+1})(x_k-x_{k+2})}y_k+\frac{(x-x_{k+2})(x-x_k)}{(x_{k+1}-x_{k+2})(x_{k+1}-x_k)}y_{k+1}$$

$$+\frac{(x-x_k)(x-x_{k+1})}{(x_{k+2}-x_k)(x_{k+2}-x_{k+1})}y_{k+2}=\sum_{i=k}^{k+2}\left(\prod_{\substack{j=k\\ \neq i}}^{k+2}\frac{x-x_j}{x_i-x_j}\right)y_i \quad (9\text{–}1)$$

二、数值积分法

当直流电机负载运行时，气隙磁通密度分布发生畸变。此时每极磁通必须由畸变分布的气隙磁通密度对极弧下的圆周长度积分得到，这个磁通的求取对于计算交轴电枢反应去磁磁动势是必要的。但是，由于负载时气隙磁通密度的分布不能用数学解析式表达，因此积分不能直接进行。但在利用电子计算机的条件下，用数值积分的办法却能达到足够的精度。此外，对于梨形槽槽身梯形部分的漏磁导系数，由于精确的计算要用到比较复杂的积分，因此也可采用数值积分法。较基本的数值积分法有梯形法、辛普生法等，在此介绍最简单的梯形法。

把区间$[a, b]$用点x_0(即a)、x_1、…、x_{n-1}、x_n(即b)等分成n段(也可以不是等分)。分点处函数$y=f(x)$的值记为$f(x_0)$、$f(x_1)$、…、$f(x_{n-1})$、$f(x_n)$。任取一点x_i及其左邻点x_{i-1}，以$f(x_{i-1})$和$f(x_i)$为两底、以$h \doteq x_i-x_{i-1}=\dfrac{b-a}{n}$为高构成一个梯形，其面积为

$$S_i=\frac{b-a}{2n}[f(x_{i-1})+f(x_i)] \tag{9-2}$$

于是，整个区间的积分

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{n} S_i=\frac{b-a}{n}\left[\frac{1}{2}f(x_0)+f(x_1)+\cdots+f(x_{n-1})+\frac{1}{2}f(x_n)\right] \tag{9-3}$$

这就是梯形法。

现在用梯形法来计算负载时的每极磁通。此时，在上述积分中，$b-a=b_p$，$f(x)=l_a B_\delta(x)$，考虑到电枢长度l_a为常数，每极磁通

$$\Phi\approx\frac{b_p l_a}{n}\left[\frac{1}{2}B_\delta(x_0)+B_\delta(x_1)+\cdots+B_\delta(x_{n-1})+\frac{1}{2}B_\delta(x_n)\right] \tag{9-4}$$

当采用均匀气隙时，可用过渡特性曲线 $B_\delta(F_{\delta t})$ 代替气隙磁通密度分布曲线 $B_\delta(x)$，同时令

$$\Phi(F_{\delta t})=B_\delta(F_{\delta t})b_p l_a \tag{9-5}$$

则式(9-4)化为

$$\Phi\approx\frac{1}{n}\left[\frac{1}{2}\Phi(F_{\delta t0})+\Phi(F_{\delta t1})+\cdots+\Phi(F_{\delta tn-1})\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2}\Phi(F_{\delta tn})\right] \tag{9-6}$$

对于任意一点 i，可用下式求取

$$F_{\delta ti}=F'_{\delta t}+b_p A\left(\frac{i}{n}-\frac{1}{2}\right) \tag{9-7}$$

式中　$F'_{\delta t}$——主磁极中心线上气隙磁动势与齿磁动势之和。

下面用梯形法计算梨形槽槽身梯形部分的漏磁导系数。

计算槽漏磁导系数 λ 的积分式为

$$\lambda=\int_0^h\left(\frac{S_x}{S}\right)^2\frac{dx}{b_x} \tag{9-8}$$

式中　h——槽的高度；

x——从槽底向上的坐标；

b_x——在 x 高度上的槽宽；

S——槽身(有导线部分)总面积；

S_x——x 高度以下的槽身(有导线的部分)面积。

在计算梨形槽槽身梯形部分的漏磁导系数 λ_h 时，式(9-8)中的 h 为槽身梯形部分高度。若令梯形上底宽为 b_1，下底宽为 b_2，槽底半圆的半径为 r_2，则有

$$b_x=b_2-(b_2-b_1)\frac{x}{h} \tag{9-9}$$

$$S_x = \frac{\pi}{2} r_2^2 + \frac{b_x + b_2}{2} x \qquad (9\text{-}10)$$

采用数值积分时，令

$$f(x) = \left(\frac{S_x}{S}\right)^2 \frac{1}{b_x},\ a=0,\ b=h,$$

就直接可用式(9-3)计算。

在此顺便给出梨形槽槽身下半圆部分的漏磁导系数 λ_{r2} 和上半圆部分的漏磁导系数 λ_{r1} 的精确计算方法。

在图 9-3 中，将下半圆计算时所用的自变量由 x 更改为 α，则 x 从 0 到 r_2，就相当于 α 从 0 到 π。根据三角关系，有

$$x = r_2\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right) \qquad (9\text{-}11)$$

$$b_x = 2r_2 \sin\frac{\alpha}{2} \qquad (9\text{-}12)$$

$$S_x = \frac{1}{2} r_2^2 (\alpha - \sin\alpha) \qquad (9\text{-}13)$$

将式(9-11)两边微分，得

$$dx = \frac{r_2}{2} \sin\frac{\alpha}{2}\, d\alpha \qquad (9\text{-}14)$$

将式(9-12)～(9-14)代入式(9-8)，就可求出 λ_{r2} 的算式如下

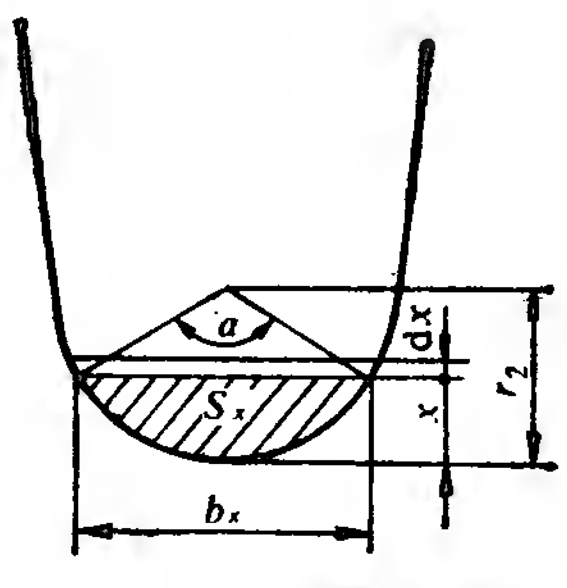


图 9-3　梨形槽下半圆的 λ_{r2} 计算用图

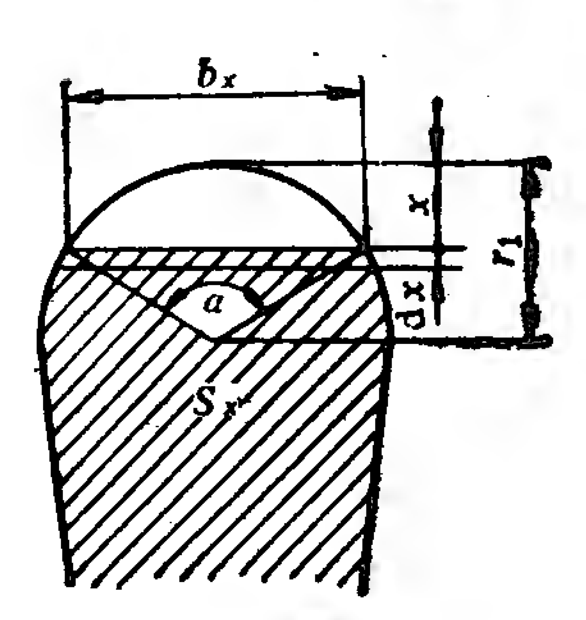


图 9-4　梨形槽上半圆的 λ_{r1} 计算用图

$$\lambda_{r2}=\int_0^{r_2}\left(\frac{S_x}{S}\right)^2\frac{dx}{b_x}$$

$$=\int_0^{\pi}\left[\frac{\frac{1}{2}r_2^2(\alpha-\sin\alpha)}{S}\right]^2\frac{\frac{r_2}{2}\sin\frac{\alpha}{2}d\alpha}{2r_2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

$$=\frac{r_2^4}{S^2}\frac{1}{16}\int_0^{\pi}(\alpha-\sin\alpha)^2d\alpha=0.35\frac{r_2^4}{S^2}\tag{9-15}$$

在图 9-4 中，类似于图 9-3，有

$$x=r_1\left(1-\cos\frac{\alpha}{2}\right)\tag{9-16}$$

$$b_x=2r_1\sin\frac{\alpha}{2}\tag{9-17}$$

$$S_x=S-\frac{1}{2}r_1^2(\alpha-\sin\alpha)\tag{9-18}$$

和

$$dx=\frac{r_1}{2}\sin\frac{\alpha}{2}d\alpha\tag{9-19}$$

将式(9-17)～(9-19)代入式(9-8)，通过运算，可求出 λ_{r_1} 的算式如下

$$\lambda_{r_1}=\int_0^{r_1}\left(\frac{S_x}{S}\right)^2\frac{dx}{b_x}$$

$$=\int_0^{\pi}\left[1-\frac{\frac{1}{2}r_1^2(\alpha-\sin\alpha)}{S}\right]^2\frac{\frac{r_1}{2}\sin\frac{\alpha}{2}d\alpha}{2r_1\sin\frac{\alpha}{2}}$$

$$=\int_0^{\pi}\left\{1+\left[\frac{\frac{1}{2}r_1^2(\alpha-\sin\alpha)}{S}\right]^2-\frac{r_1^2(\alpha-\sin\alpha)}{S}\right\}\frac{d\alpha}{4}$$

$$=0.785+0.35\frac{r_1^4}{S^2}-0.732\frac{r_1^2}{S}\tag{9-20}$$

于是，梨形槽整个槽身的漏磁导系数 λ_L 为

$$\lambda_L = \lambda_h + \lambda_{r2} + \lambda_{r1} \tag{9-21}$$

尚需指出，当梨形槽上部不是半圆时(为区别起见，这种槽型称为圆底槽)，λ_{r1} 不存在，但在槽口漏磁导系数计算中要增加槽口与槽身之间小梯形的漏磁导系数。

三、对分法

当电枢齿部高度饱和时（一般认为齿部磁通密度超过18000高斯时），磁通要向槽部扩散。假定在齿、槽中的等磁位面与电枢表面平行，则齿部磁通密度 B_t 与磁场强度 H_t 之间满足如下关系

$$B_t = B'_t - \mu_0 H_t k_s \tag{9-22}$$

式中 B'_t——齿部计算磁通密度；

k_s——槽部校正系数(见第五章)。

同时，B_t 与 H_t 之间又满足磁化曲线的关系，可表示为下式

$$B_t = B_t(H_t) \tag{9-23}$$

由式(9-22)和式(9-23)可得方程式

$$B'_t - \mu_0 H_t k_s - B_t(H_t) = 0 \tag{9-24}$$

解此方程式，便可求得 H_t 及其相应的 B_t。但因式(9-24)不是解析式，故不能用一般的方法求解，在使用电子计算机时，可用对分法求解。

又如，在负载时，每极磁通 Φ 与 $F'_{\delta t}$(主磁极中心处气隙磁动势与齿磁动势之和)的关系可由式(9-7)代入式(9-6)得到，但 $\Phi(F'_{\delta t})$ 也不能表达为解析式。交轴电枢反应去磁磁动势 F_{aqd} 的求取是先由下式求解出 $F'_{\delta t}$

$$\Phi(F'_{\delta t}) - \Phi_N = 0 \tag{9-25}$$

式中 Φ_N——每极额定主磁通。

再由下式计算而得

$$F_{aqd} = F'_{\delta t} - F_{\delta tN} \qquad (9\text{–}26)$$

式中 $F_{\delta tN}$——每极额定主磁通在过渡特性上对应的 $F_{\delta t}$。

其中式(9–25)的求解也要用对分法。

又如，对于并励发电机，如用 $E_0(I_f)$表示空载特性，则空载电动势 E_0 由如下方程式解得

$$E_0(I_f) - I_f R'_f = 0 \quad (9\text{–}27)$$

式中 R'_f——并励电路总电阻。

式(9–27)也要用对分法求解。

现将对分法原理叙述于下。

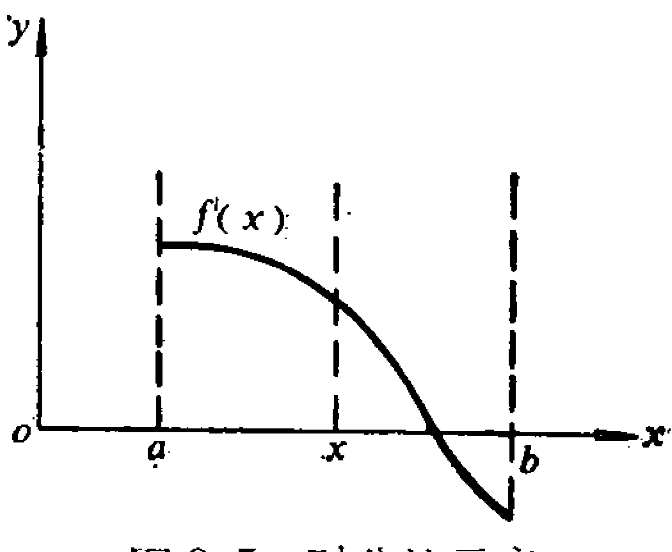


图 9–5 对分法示意

设函数 $f(x)$在区间$[a, b]$内与 x 轴只有一个交点，且 $f(a)>0$, $f(b)<0$, 如图 9–5 所示，则方程式$f(x)=0$ 的解法如下。取 $x=\dfrac{a+b}{2}$, 计算 $f(x)$。如所得$f(x)>0$, 则以 x 代替 a; 如$f(x)<0$, 则以 x 代替 b。这样，区间缩小了一半，而新区间的两端点是新的 a 和 b。然后重新取$x=\dfrac{a+b}{2}$, 计算 $f(x)$。如此反复计算，直到 $|f(x)|$ 小于预定误差，或者 $|a-b|$ 小于预定误差时为止。此时的 x 即为所求之解。

四、电枢开槽法

电枢开槽的过程分两个步骤。首先是选择槽数 Z 和每槽的虚槽数 u。它们是根据电枢总导体数预选值 N'_a 确定的，同时要考虑到换向器的平均片间电压 u_{Kav} 不得超过允许值。但对采用半闭口槽的电机来说，Z 和 u 容易确定，故可以作为已知，亦即这一步骤可省略。因为这时元件匝数较多，并可

做成分数匝，完全可以通过元件匝数的增减来使电枢总导体数的实际值和预选值相符合，而不必更动 Z 和 u；而 u_{Kav} 不超过允许值这一点在确定 Z 和 u 时可以先考虑的。反之，对于采用开口槽的电机，确定 Z 和 u 的这一步骤是不能省略的。这时，由于采用扁导线，元件匝数只能固定为 1 或 2，要得到合适的电枢总导体数；就要靠调整 Z 和 u 的组合。在机器计算用的程序中，Z 和 u 的确定可用下法。在元件匝数为已知的条件下，首先根据电枢直径和电枢绕组型式确定一个 Z 的选择范围和一个 u 的选择范围，然后使 Z 和 u 分别在其选择范围中从小到大逐次取值，在每次取值时计算电枢总导体数 N_a 和平均片间电压 u_{Kav}，当满足 N_a 和 N'_a 很接近而 u_{Kav} 不超过允许值的条件时，认为 Z 和 u 的组合是合适的。

开槽的第二步是确定槽形尺寸。对于矩形槽，就是要确定槽身高和槽宽。对于梨形槽或圆底槽，则要确定槽身梯形部分的高度，下半圆的半径以及上半圆的半径(对于梨形槽)或槽口下小梯形的高度和下底宽(对于圆底槽)。至于槽口高 h_0 和梨形槽、圆底槽的槽口宽 b_0，因与加工工艺有关，一般作为已知。

首先根据由生产经验得到的槽总高与电枢直径的关系曲线，初步确定槽总高 h_s，同时根据合适的齿部磁通密度值（如 18000 高斯）初步确定齿宽 b_t（对于矩形槽，为 1/3 齿高处齿宽），然后由 h_s、b_t 以及 h_0、b_0 计算其它尺寸。计算方法参见第三章，这里只给出梨形槽或圆底槽下半圆半径 r_2 的算法，梨形槽上半圆半径 r_1 的算法以及圆底槽槽身上部宽 b_1 的算法

$$r_2=\frac{\pi(D_a-2h_s)-b_tZ}{2(Z-\pi)} \qquad (9\text{-}28)$$

$$r_1=\frac{\pi(D_a-2h_0)-b_tZ}{2(Z+\pi)} \tag{9-29}$$

$$b_1=\frac{\pi(D_a-2h_0+b_0\operatorname{tg}\alpha)-b_tZ}{Z+\pi\operatorname{tg}\alpha} \tag{9-30}$$

式中　α——槽口下小梯形的斜面与水平面的夹角。

槽形尺寸初步确定后，根据槽面积和槽满率计算导线直径(对于梨形槽或圆底槽)，或根据导线的排列计算导线的宽和厚(对于矩形槽)。继而由导线截面积计算电枢绕组的电流密度 J_a，再由它来修正槽形尺寸。当 J_a 与预定值相比过低时，可通过减小槽总高 h_s 来缩小槽面积；而当 J_a 过高时，可通过减小齿宽来增大槽面积。直到 J_a 与预定值之间的误差在一定范围内时，槽形才算确定。

五、励磁绕组计算法

通过磁路计算，在确定了串励绕组匝数 W_s 和并励(或他励)绕组磁动势 F_f 后，就要对这两种绕组进行计算。要求确定这两种绕组的线规、这两种绕组的高度和宽度以及高度方向的匝数和宽度方向的层数。计算时，除各绕组的电流密度须满足预定要求外，还应使串励绕组宽度比并励绕组宽度小一些(如取两者之比为0.6左右)，并使并励绕组有一定的励磁余量。

一般先计算串励绕组。串励绕组的线规一般取为与换向极绕组相同；当容量较大时，通常因主磁极绕组空间位置裕量较大，可适当加大串励绕组导线截面积，以利于减小损耗和发热。串励绕组其它尺寸的确定方法如下：先在绕组高度方向上放2匝，由此计算串励绕组高度，并由总的绕组高度减去它而得到并励绕组高度，由并励绕组高度估算出并励绕组的宽度。继而计算串励绕组宽度方向的层数以及串励绕组的宽

度，并与并励绕组估计宽度比较，如果超过一定的数值(如超过并励绕组估计宽度的0.7倍)，则在串励绕组高度方向上加1匝。然后重复计算，直到符合要求为止。尚须指出，当串励绕组采用裸扁线时，由于在绕组高度方向的匝数即为全部匝数，就不必进行反复计算。

接着计算并励绕组。由于此时已知的不是并励电流，而是励磁余量，因此计算时不能先由并励电流求出匝数和线规，再算出绕组全部数据。但是，如果从励磁余量出发来计算，则首先要知道并励绕组的平均半匝长，而它在并励绕组计算前又是无法精确计算的。因此，可采用试凑法计算。方法如下：使并励绕组的线规按线规表从小到大逐次取值，每次取值时，由电流密度预定值算出并励电流，并由此算出并励绕组的匝数和全部数据以及并励绕组的电阻和励磁余量，然后比较励磁余量的计算值和预定的最低值。一开始，由于线规小，励磁余量的计算值也小，不会超过预定的最低值。当线规加大到某一值，使励磁余量的计算值略超过预定的最低值时，认为这时的并励绕组的数据是合适的。

9-3　小型直流电机的电磁计算程序

本程序用基于 $ALGOL_{60}$ 算法语言的709机语言编制，适用于一般用途的小型直流电机的电磁计算。在程序编制中尽可能地考虑了通用性。本程序的适用范围如下：

(1) 电机运行方式可以为电动机或发电机；

(2) 电枢绕组型式可以为单波、单叠或单蛙；

(3) 电枢槽型可以为半闭口的梨形槽、圆底槽或开口的矩形槽；

(4) 绕组导线型式可以为绝缘圆导线或绝缘扁导线，换

向极绕组和串励绕组还可以为裸扁导线;

(5) 磁极材料可以为 DT_1 电工钢片或普通磁极钢片;

(6) 定子绕组材料可以为铜或铝。

此外,在程序中还设有开槽计算,因此,电枢槽型可以是已知的,也可以由程序算出。串励绕组是否需要采用,在程序中也有两种考虑。但在本程序中未考虑带补偿绕组的情况。

本程序编成后,已根据整个适用范围选择了 16 个典型的规格进行试算,试算结果良好,与原有手算结果基本一致。在本节中将结合输入数据和输出数据的说明,给出一个用本程序计算的实例,这是 Z3 系列中 125 千瓦、220 伏、1500 转/分的并励电动机,计算时由程序自动开槽,并考虑带有串励绕组。

本程序的结构已示于图 9-1,用到的一些处理方法已在 9-2 节中介绍。在此给出源程序,说明程序的使用方法,指出程序中符号的意义,并对源程序作适当解释。

一、源程序

BEGIN REAL XI1, XI2, XI3, XI4, XI5, XI6, PN, UN, UF, NN, DELN1, P, DA, DIA, LA1, LA2, DV, NV, Z, U, H0, B0, H1, B1, H2, R, DJ, DIJ, DELJA, ALP, BM1, HW, LMK, BMK, HWK, DEL, DELK, DK, BB, LB, JA1, JK1, JF1, PFW, IN, IA, IF, DELN, ETA, PCUA, PCUK, PCUF, PCUS, PFET, PFEJ, PFB, PB, PAD, RA, RK, RF, RS, GCUA, GCUK, GCUF, GCUS, AA, AAJA, JA, JK, JF, JS, JB, PHI, BD, BTA, BJA, BM, BJ, FD, FTA, FJA, FM, FJ, FN, FAQD, BDK, EX, THE, KKN, UKAV, KF, KE, KD, KDK, VA, VK, LA, WA, N, NCA,

```
DCA, ACA, BCA, LAAV, NB, AK, WK1, NHK,
NBK, DCK, ACK, BCK, LKAV, BWK, WF, NHF,
NBF, DCF, LFAV, HWF, BWF, AS, WS1, NHS,
NBS, DCS, ACS, BCS, LSAV, HWS, BWS, PI, X17,
PK, TAU, BP, TA, TA3, HS, S, SR, BT, Z1, Z2,
U1, U2, DU, K, N1, EPS, A, EA, ACUA, NS, DI,
AI, BI, Y1T, EPSK, TK, BET, BK, BN, LAMS,
LAMT, LAME, KBET, XI, WDK, WAQ, WK,
ACUK, RHO, GAMA, KT, KS, LTA, HJA, AJA,
LJA, AM, LM, AJ, LJ, BTA1, BTA2, HT, HA, HM,
HJ, PHI1, PHI2, FDT, FS, WS, ACUS, FF, ACUF,
BT2, F, GFET, GFEJ, SIGP, BD1, KF1, KI, 1F0,
KE0, ETA0, I, J, G1, G2, G3;
  ARRAY DB [1:48], A1B[1:25], B1B [1:12], A2B
[1:29], B2B[1:11], HAB[1:25], HM1B, HM2B[1:20],
HJB [1:16], BXB [1:25], BDB, HSB, DAB [1:5],
KIB, KE1B, KE2B, ETAB, PNB [1:9], PHII, BDI,
FI, FDTI[1:14]; PROC LAG(N, U, X, Y, V); VALUE
N, U; REAL N, U, V; ARRAY X, Y; BEGIN REAL
L, I, J, K;
  IF U<X[1] THEN K: =1; IF U≥X [N-1] THEN
     K: =N-2;
  FOR I: =1 STEP 1 UNTIL N-2 DO IF U ≥ X[I]
       ∧U<X[I+1] THEN K: =I; V: =0;
  FOR J: =K STEP 1 UNTIL K+2 DO
  BEGIN L: =1;
  FOR I: =K STEP 1 UNTIL K+2 DO IF I≠J
```

```
            THEN L: =L*(U-X[I])/(X[J]- X [I]);
            V: =V+L*Y[J]
      END
    END;
    PROC JIFEN;
    BEGIN F: =0;
      FOR I: =0 STEP 1 UNTIL 100 DO
      BEGIN G1: =2*R-(2*R-B1)*I/100;
        G2: =SR+(G1+2*R)/2*H2*I/100;
        F: =IF I=0∨I=100 THEN F+G2↑2/G1/2 ELSE
            F+G2↑2/G1
      END;
      F: =H2/100*F/S↑2
    END;
    PROC DIAN1;
    BEGIN ACA: =BCA: =0;
      AS: =(B1/2+R-0.07)*(H1+H2-0.22)+PI/2*
          (R-0.035)↑2-(B1/2+R)*0.07;
      FOR NCA: =1 STEP 1 UNTIL 5 DO
      BEGIN DI: = #SQRT(78*AS/NS/NCA); IF DI≤
            1.7 THEN GOTO WG1
      END;
  WG1:G1: =IF DI≤0.245 THEN 0.02 ELSE IF DI≤
                0.335 THEN 0.025 ELSE
            IF DI≤0.53 THEN 0.03 ELSE IF DI≤
                0.75 THEN 0.04 ELSE
            IF DI≤1 THEN 0.05 ELSE 0.06
```

```
    DCA: =DI-G1;
    FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 46 DO IF DCA >
            (DB[I]+DB[I+1])/2∧
      DCA ≤(DB [I+1] +DB[I + 2])/2 THEN DCA: =
              DB[I+1];
    ACUA: =0.7854*DCA↑2*NCA
END;
PROC DIAN 2;
BEGIN DCA: =0; AI: = (BI -0.124) /U*10;
    BI: =IF XI2= 3 THEN (H2 -0.1)/WA/0.4 ELSE
          (H2-0.18)/WA/0.2;
    NCA: =1; IF BI>8 THEN BEGIN BI: =BI/2;
          NCA: =2 END;
    G1: =IF AI≤1.32 THEN 0.14 ELSE IF AI≤
                    2.05 THEN 0.15 ELSE
          IF AI≤2.96 THEN 0.16 ELSE 0.17;
    ACA: =AI-G1;
    FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 24 DO IF ACA ≥ A1B
              [I] ∧ACA<A1B[I+1] THEN
          ACA: =A1B[I];
    G1: =IF BI≤2.96 THEN 0.16 ELSE IF BI≤4.67
                  THEN 0.17 ELSE
          IF BI≤6.49 THEN 0.19 ELSE 0.2;
    BCA: =BI-G1;
    FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 11 DO IF BCA ≥B1B
              [I] ∧BCA<B1B[I+1]THEN
          BCA: =B1B[I];
```

```
  G2: = IF ACA≤1.6 THEN 0.215 ELSE IF ACA≤
        2.24 THEN 0.363 ELSE 0.55;
  ACUA: = (ACA*BCA-G2)*NCA
END;
PROC DING1(ACU, DC, W, NH, NB, HW, BW);
VALUE W, HW; REAL ACU, DC, W, NH, NB,
        HW, BW;
BEGIN DC: = #SQRT(ACU/0.7854);
  FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 46 DO IF DC> (DB[I]
          +DB[I+1])/2 ∧
       DC≤(DB[I+1]+DB[I+2])/2 THEN DC: =
          DB[I+1];
  G1: = IF DC≤0.225 THEN 0.02 ELSE IF DC≤0.31
             THEN 0.025 ELSE
       IF DC≤0.5 THEN 0.03 ELSE IF DC≤0.71
             THEN0.04 ELSE
       IF DC≤0.95 THEN 0.05 ELSE IF DC≤1.56
             THEN 0.06 ELSE 0.07;
  DI: = DC+G1; ACU: = 0.7854*DC↑2;
  G1: = IF DI≤0.38 THEN 1.12 ELSE IF DI≤0.59
             THEN 1.1 ELSE
       IF DI≤0.86 THEN 1.08 ELSE IF DI≤1.2
             THEN 1.06 ELSE
       IF DI≤1.62 THEN 1.05 ELSE IF DI≤1.81
             THEN 1.04 ELSE 1.03;
  NH: = (HW*10/G1)÷DI;
  NB: = IF W/NH = W÷NH THEN W÷NH ELSE W
```

```
      ÷NH+1;
  BW:=NB*DI/10
END;
PROC DING2(ACU, AC, BC, W, NH, NB, HW, BW);
VALUE W, HW, REAL ACU, AC, BC, W, NH,
        NB, HW, BW;
BEGIN AC:=#SQRT(ACU/3.5);
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 23 DO IF AC>(A1B[I]
          +A1B[I+1])/2∧
      AC≤(A1B [I+1] + A1B [I+2])/2 THEN
          AC:=A1B[I+1];
  G1:=IF AC≤1.18 THEN 0.14 ELSE IF AC≤1.9
      THEN 0.15 ELSE
      IF AC≤2.8 THEN 0.16 ELSE 0.17;
  AI:=AC+G1; BC:=ACU/AC;
  FOR I:=1 STEP 1 UNTIL 10 DO IF BC>(B1B
          [I]+B1B[I+1])/2∧
      BC≤(B1B[I+1]+B1B[I+2])/2 THEN BC:=
          =B1B[I+1];
  G1:=IF BC≤2.8 THEN 0.16 ELSE IF BC≤4.5
      THEN 0.17 ELSE
      IF BC≤6.3 THEN 0.19 ELSE 0.2;
  BI:=BC+G1;
  G2:=IF AC≤1.6 THEN 0.215 ELSE IF AC≤2.24
              THEN 0.363 ELSE 0.55;
  ACU:=AC*BC-G2;
  G1:=IF AI≤1.2 THEN 1.08 ELSE IF AI≤1.74
```

```
                THEN 1.07 ELSE
          IF AI≤2.1 THEN 1.06 ELSE IF AI≤2.83
                THEN 1.05 ELSE
          IF AI≤4.4 THEN 1.04 ELSE 1.03;
   NH: =(HW*10/G1)÷BI;
   NB: =IF W/NH=W÷NH THEN W÷NH ELSE
          W÷NH+1;
   BW: =NB*AI*G1/10
END;
PROC DING3(ACU, AC, BC, W, NH, NB, BW);
VALUE W; REAL ACU, AC, BC, W, NH, NB BW;
BEGIN FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 27 DO IF AC>
          (A2B[I]+A2B[I+1])/2∧AC≤(A2B[I+1]+
          A2B[I+2])/2 THEN AC: =A2B[I+1];
   BC: =ACU/AC;
   FOR I: =1 STEP 1 UNTIL 9 DO IF BC>(B2B [I]
            +B2B[I+1])/2∧
         BC≤(B2B[I+1]+B2B[I+2])/2 THEN BC: =
            B2B[I+1];
   G2: =IF AC≤1.6 THEN 0.215 ELSE IF AC≤2.24
                THEN 0.363 ELSE
         IF AC≤3.55 THEN 0.55 ELSE IF AC≤6.7
                THEN 0.86 ELSE 1.24;
   ACU: =AC*BC-G2; NH: =W; NB: =1; BW: =
          BC/10
END;
#READ (0, '10', DB, A1B, B1B, A2B, B2B, HAD.
```

```
        HM1B, HM2B, HJB, BXB, BDB, HSB, DAB, KIB,
        KE1B, KE2B, ETAB, PNB);
L01:STOP;
     #READ (0, '10', XI1, XI2, XI3, XI4, XI5, HI6,
        PN, UN, UF, NN, DELN1, P, DA, DIA, LA1,
        LA2, DV, NV, Z, U, H0, B0, H1, B1, H2, R, DJ,
        DIJ, DELJA, ALP, BM1, HW, LMK, BMK, HWK,
        DEL, DELK, DK, BB, LB, JA1, JK1, JF1, PFW);
     #PRINT(0, '10', 6X, 4HXI1=, I10, 6X, 4HXI2=,
        I10, 6X, 4HXI3=, I10, 6X, 4HXI4=, I10, 6X,
        4HXI5=, I10, 6X, 4HXI6=, I10, 7X, 3HPN=,
        F10.3, 7X, 3HUN=, I10, 7X, 3HUF=, I10, 7X,
        3HNN=, I10, 4X, 6HDELN1=, F10.5, 8X, 2HP=,
        I10, 7X, 3HDA=, F10.3, 6X, 4HDIA=, F10.3,
        6X, 4HLA1=, F10.3, 6X, 4HLA2=, F10.3, 7X,
        3HDV=, F10.3, 7X, 3HNV=, I10, 8X, 2HZ=,
        I10, 8X, 2HU=, I10, 7X, 3HH0=, F10.3, 7X,
        3HB0=, F10.3, 7X, 3HH1=, F10.3, 7X, 3HB1=,
        F10.3, 7X, 3HH2=, F10.3, 8X, 2HR=, F10.3,
        7X, 3HDJ =, F10.3, 6X, 4HDIJ =, E10.3, 4X,
        6HDELJA =, F10.3, 6X, 4HALP =, F10.5, 6X,
        4HBM1=,F10.3,7X,3HHW=,F10.3,6X,4HLMK=,
        F10.3, 6X, 4HBMK=, F10.3, 6X, 4HHWK=,
        F10.3,6X,4HDEL=,F10.5, 5X,5HDELK=,F10.5,
        7X, 3HDK=, F10.3, 7X, 3HBB=, F10.3, 7X,
        3HLB=, F10.3, 6X, 4HJA1=, F10.3, 6X, 4HJK1=,
        F10.3, 6X, 4HJF1=, F10.3, 6X, 4HPFW=,
```

```
  I10, XI1, XI2, XI3, XI4, XI5, XI6, PN, UN, UF,
  NN, DELN1, P, DA, DIA, LA1, LA2, DV, NV, Z,
  U, H0, B0, H1, B1, H2, R, DJ, DIJ, DELJA, ALP,
  BM1, HW, LMK, BMK, HWK, DEL, DELK, DK,
  BB, LB, JA1, JK1, JF1, PFW);
XI7: = IF B1 = 0 THEN 1 ELSE 2; IF XI7 = 1 ∧ XI3 = 3
     THEN WA: = U;
PI: = 3.1416; PK: = IF P = 1 TAEN 0.5 ELSE P;
TAU: = PI*DA/2/P; BP: = ALP*TAU;
A: = IF XI2 = 1 THEN 1 ELSE IF XI2 = 2 THEN P
     ELSE 2*P;
LAG(5, DA, DAB, BDB, BD1);
LAG (9, PN, PNB, KIB, KI);
IF0: = KI*PN*₁₀3/UN; IF UF≠0 THEN IF0: = IF0*
     UN/UF;
IF XI1 = 1 THEN LAG (9, PN, PNB, KE1B, KE0)
     ELSE LAG(9, PN, PNB, KE2B, KE0);
LAG(9, PN, PNB, ETAB, ETA0);
KF1: = IF XI1 = 2 THEN 1.25, ELSE IF DA⩽13.8
     THEN 1 ELSE IF DA<24.5 THEN 1.05
     ELSE 1.1;
FOR LA: = LA1 STEP 0.5 UNTIL LA2 DO
BEGIN
L02: IN: = IF XI1 = 2 THEN PN*₁₀3/UN ELSE IF
     UF = 0 THEN PN* ₁₀3/ETA0/UN ELSE
     (PN*₁₀3/ETA0 − UF*IF0)/UN;
IA: = IF UF≠0 THEN IN ELSE IF XI1 = 1 THEN
```

```
        IN-IF0 ELSE IN+IF0;
  EA: =KE0*UN;    PHI: =BD1*BP*LA;    N1: =60*A*
        EA*₁₀8/P/PHI/NN;
  IF XI7=1∧XI3=3 THEN
  BEGIN G1: =(6*#SQRT(DA))÷1; G2: =(9*#SQRT
          (DA))÷1;
    IF XI2=1 THEN
    BEGIN Z1: =IF G1/2=G1÷2 THEN G1-1 ELSE G1;
            Z2: =IF G2/2=G2÷2 THEN G2-1 ELSE
            G2; U1: =3; U2: =5; DU: =2
    END ELSE
    BEGIN Z1: =IF G1/2=G1÷2 THEN G1 ELSE
            G1-1; Z2: =IF G2/2=G2÷2 THEN G2
            ELSE G2-1; U1: =2; U2: =4; DU: =1
    END;
    EPS: =0.01;
WU: FOR U: =U1 STEP DU UNTIL U2 DO FOR Z: =Z1
    STEP 2 UNTIL Z2 DO
    BEGIN K: =U*Z; UKAV: =2*P*UN/K;
      NS: =IF XI2=3 THEN 4*WA*U ELSE 2*WA*U;
      N: =NS*Z;
      IF UKAV⩽12∧#ABS(N/N1-1)⩽EPS THEN
          GOTO L03
    END;
    EPS: =EPS+0.01; GOTO WU
  END ELSE
  BEGIN K: =U*Z; UKAV: =2*P*UN/K;
```

```
    NS: =IF XI3≠3  THEN  2*((N1/Z/2+0.5)÷1)
          ELSE IF XI2=3 THEN 4*U*((N1/Z/4/U+
          0.5)÷1)ELSE 2*U*((N1/Z/2/U+0.5)÷1);
    WA: =IF XI2=3 THEN NS/4/U ELSE NS/2/U;
          N: =NS*Z
  END;
L03:PHI: =60*A*EA*₁₀8/P/N/NN;
  BD: =PHI/BP/LA; TA: =PI*DA/Z;
  IF XI7=2 THEN
  BEGIN IF XI3≠3 THEN DIAN1 ELSE DIAN2;
    JA: =IA/A/2/ACUA; HS: = H0 + H1 + H2 + R;
          GOTO L04
  END;
  LAG (5, DA, DAB, HSB, HS); BT: =BD * TA/0.93/
       18000;
  IF XI3≠3 THEN
  BEGIN
WB1:B1: =IF XI3=1 THEN(PI*(DA-2*H0)-BT*Z)
           /(Z+PI)ELSE(PI*(DA- 2*H0 + B0*0.577)
           -BT*Z)/(Z+PI*0.577);
    H1: =IF XI3 = 1 THEN B1/2 ELSE(B1 - B0)*
          0.2885;
WR:R: =(PI*(DA-2*HS)-BT*Z)/2/(Z-PI);
    IF R<0.2 THEN BEGIN HS: =HS-0.1; GOTO
          WR END;
    H2: = HS - H0 - H1 - R, DIAN1; JA: =IA/A/2/
          ACUA;
```

```
    IF JA<JA1-0.25 THEN BEGIN HS:=HS-0.1;
            GOTO WR END;
    IF JA>JA1+0.25 THEN BEGIN BT:=BT-0.02;
            GOTO WB1 END
  END ELSE
  BEGIN
WTA3:TA3:=PI*(DA-4/3*HS)/Z;
WB0:B0:=B1:=TA3-BT; H2:=HS-H0; DIAN2;
   JA:=IA/A/2/ACUA;
   IF JA<JA1-0.25 THEN BEGIN HS:=HS-0.1;
            GOTO WTA3 END;
   IF JA>JA1+0.25 THEN BEGIN BT:=BT-0.02;
            GOTO WB0 END
  END;
L04:AA:=IA*N/A/2/PI/DA; AAJA:=AA*JA;
  LAAV:=IF P=1 THEN 0.85*TAU+LA ELSE IF
          XI3 ≠ 3 THEN 1.1*TAU+LA ELSE
          1.4*TAU+LA;
  RA:=0.0217*LAAV*N/ACUA/400/A↑2; PCUA:=
        IA↑2*RA;
  GCUA:=1.05*N*LAAV*ACUA*8.9*₁₀-5;
  VA:=PI*DA*NN/6000; VK:=PI*DK*NN/6000;
  NB:=IA/P/BB/LB÷12+1; IF P=1∧NB<2 THEN
        NB:=2;
  JB:=IA/P/BB/LB/NB;
  Y1T:=(Z/2/P+0.25)÷1; EPSK:=#ABS (K/2/P
         -U*Y1T);
```

```
TK: = PI*DK/K; BET: = BB/TK;
BK: = TK*DA/DK*(U+BET+ EPSK - A/P);  BN: =
        (1-ALP)*TAU;
KKN: = BK/BN; KDK: = TA/(TA - B0↑2/(5*DELK+
        B0));
IF XI3 = 1 THEN
BEGIN SR: = PI/2*R↑2;
  S: = SR+ (B1/2+R)*H2+PI/2*H1↑2; JIFEN;
  LAMS: = H0 / B0+0.785 + F + 0.35* (H1↑4 + R↑4)/
           S↑2-0.732*H1↑2/S
END ELSE IF XI3 = 2 THEN
BEGIN SR: = PI/2*R↑2;  S: = SR + (B1/2 + R) * H2;
        JIFEN;
  LAMS: = H0/B0 + 2*H1/(B0 + B1) +F+ 0.35*R↑4/
           S↑2
END ELSE LAMS: = H0/B0+H2/B1/3;
LAMT: = 0.15 * BMK / KDK / DELK;  LAME: = 0.75*
          (LAAV/LA-1);
G1: = G2: = 0;
FOR I: = 1 STEP 1 UNTIL 5 DO IF  U>I∧BET >I
      THEN G1: = G1+ (U-I)*(BET-I);
G1: = 1+2*G1/U/BET;
FOR I: = 1 STEP 1 UNTIL 5 DO
BEGIN IF U > I ∧ BET > #ABS (EPSK-I) THEN
          G2: = G2+ (U-I)*(BET - #ABS(EPSK-I));
  IF U>I∧BET>#ABS(EPSK+I) THEN  G2: = G2
          + (U-I)*(BET - #ABS(EPSK+I))
```

```
END;
G2:=IF BET>EPSK THEN (G2+U*(BET-EPSK))*
      2/U/BET ELSE G2*2/U/BET;
KBET:=2*G1+G2;
XI:=0.4*PI*(KBET/2/BET* (LAMS+LAMT) +
      LAME);
EX:=2*XI*AA*LA*VA*WA*₁₀-6;
BDK:=AA*XI*P/PK+1.25*AA/(1-ALP)*(P/PK-1)
      +0.75*₁₀6*A/2/WA/VA/LA/BET/PK;
WDK:=0.88*BDK*DELK*KDK/IA;
WAQ:=(N-2*P*WA*BET)*(Z/2/P - EPSK/U)/4/
      A/Z;
WK:= WDK + WAQ;  AK:=IF IA>500 THEN
      2 ELSE 1;
WK1:=(AK*WK+0.6)÷1; WK:=WK1/AK;
THE:=8*A*P*WK/N; ACUK:=IA/AK/JK1;
IF XI4=1 THEN
BEGIN ACK:=BCK:=0; DING1(ACUK, DCK, WK1,
      NHK, NBK, HWK, BWK)
END ELSE IF XI4=2 THEN
BEGIN DCK:=0; DING2( ACUK, ACK, BCK, WK1,
      NHK, NBK, HWK, BWK)
END ELSE
BEGIN DCK:=0; ACK:=HWK/(WK1+1)*10-0.35;
      DING3 (ACUK, ACK, BCK, WK1, NHK,
      NBK, BWK)
END;
```

```
   JK: = IA/AK/ACUK;
   LKAV: = IF XI4≠3 THEN BMK+LMK + 1.2 + PI/
            2*BWK - 0.43 ELSE LMK - 1.6 + PI/2*
            (BMK+0.6+BWK);
   RHO: = IF XI6=1 THEN 0.0217 ELSE 0.0346;
   GAMA: = IF XI6=1 THEN 8.9 ELSE 2.7;
   RK: = RHO*4*PK*WK1*LKAV/100/ACUK/AK↑2;
   PCUK: = IA↑2 * RK;
   GCUK: = 1.05*4*PK*WK1*LKAV*ACUK*GAMA*10
         -5;
L05: KD: = TA/(TA-B0↑2/(5*DEL+B0));
   BT: = IF XI3≠3 THEN PI*(DA-2*(H0+H1)-H2)
        /Z-(B1/2+R) ELSE PI*(DA-4/3*HS)/Z-B1;
   KT: = TA/0.93/BT;
   KS: = IF XI3≠3 THEN (B1/2+R)/0.93/BT ELSE
        B1/0.93/BT;
   LTA: = IF XI3≠3 THEN H2+2/3*(H1+R) ELSE
         HS;
   HJA: = (DA-DIA)/2-(HS-R/3)-2/3*DV;
   AJA: = 0.92*HJA*LA; LJA: = PI*(DA-2*(HS-R/3)
         +DIA)/8/P;
   AM: = 0.95*BM1*LA; LM: = (DIJ-DA)/2-DEL;
   AJ: = (DJ-DIJ)/2*(LA + DELJA); LJ: = PI*(DJ +
        DIJ)/8/P;
   FOR I: = 1 STEP 1 UNTIL 14, 10 DO
   BEGIN PHI1[I]: = PHI*I/10; BDI[I]: = BD*I/10;
     FD: = 0.8*KD*DEL*BDI[I]; BTA1: = BTA: =
          KT*BDI[I];
```

```
    IF BTA1≤18000 THEN GOTO WHT; G1: =BTA1;
              G2: =16000;
WBTA:BTA: =(G1+G2)/2; LAG(25, BTA, BXB, HAB,
              HT);
    BTA2: =BTA+1.2566*HT*KS;
    IF #ABS(BTA1-BTA2)>10 THEN
    BEGIN IF BTA1>BTA2 THEN G2: =BTA ELSE
            G1: =BTA;
            GOTO WBTA
    END;
    IF BTA<18000 THEN BTA: =18000;
WHT:LAG(25, BTA, BXB, HAB, HT);
    FTA: =HT*LTA; BJA: =PHII[I]/2/AJA;
    LAG(25, BJA, BXB, HAB, HA); FJA: =HA*LJA;
    G1: =IF P=1 THEN 1.15 ELSE 1.2; BM: =G1*
          PHII[I]/AM;
    IF XI5=1 THEN LAG(20, BM, BXB, HM1B, HM)
            ELSE LAG(20, BM, BXB, HM2B, HM);
    FM: =HM*LM; BJ: =G1*PHII[I]/2/AJ;
    LAG(16, BJ, BXB, HJB, HJ); FJ: =HJ*LJ;
    FI[I]: =FD+FTA+FJA+FM+FJ; FDTI[I]: =FD
            +FTA
  END;
L06:FN: =FI[10]; G1: = FDTI[10]; G2: =1.5*FDTI
          [10];
WF12:F: =(G1+G2)/2; PHI1: =0;
  FOR I: =-50 STEP 1 UNTIL 50 DO
  BEGIN FDT: =F+0.5*BP*AA*I/50;
```

```
    LAG(14, FDT, FDTI, PHII, G3);
    PHI1: =IF I = - 50VI = 50 THEN PHI1 + G3/2
            ELSE PHI1+G3
  END;
  PHI1: =PHI1/100;
  IF #ABS(G2-G1)>1 THEN
  BEGIN IF PHI1<PHI THEN G1: =F ELSE G2: =
          F; GOTO WF12
  END;
  FAQD: =F-FDTI[10];
L07: IF DELN1= -1 THEN
  BEGIN FS: =AS: =WS: =WS1: =DCS: =ACS: =BCS
          : =NHS: = NBS : = HWS : = BWS : = JS : =
          LSAV: =RS: =PCUS: =GCUS: =0;
    FF: =FN+FAQD; HWF: =HW
  END ELSE
  BEGIN PHI1: =IF XI1=1 THEN PHI*(UN-2)/EA
          / (1 + DELN1) ELSE PHI * UN / EA* (1 +
          DELN1);
    LAG(14, PHI1, PHII, FI, FF);
    IF XI1=2∧UF=0 THEN FF: =FF/(1+DELN1);
    FS: =FN + FAQD - FF; AS: = AK; WS1: = (FS/
          IA*AS+0.6)÷1;
    WS: =WS1/AS; FS: =IA*WS; FF: =FN+FAQD-
          FS;
    ACUS: =IA/AS/JK1; IF XI4=3 THEN ACUS: =
            ACUS/0.9;
```

```
    IF XI4=1 THEN
    BEGIN ACS:=BCS:=0;  G3:=1.13*DI/10;  HWS
            :=2*G3;
WDCS:DING1 (ACUS, DCS, WS1, NHS, NBS, HWS,
       BWS);
       HWF:=HW - HWS;  BWF:=0.013*FF/JF1/
              HWF;
       IF BWS>0.7*BWF THEN
       BEGIN HWS:=HWS+G3; GOTO WDCS
       END
    END ELSE IF XI4=2 THEN
    BEGIN DCS:=0; G3:=1.1*BI/10;  HWS:=2*G3;
WACS:DING 2 (ACUS, ACS, BCS, WS1, NHS, NBS,
       HWS, BWS);
       HWF:=HW - HWS;  BWF:=0.013*FF/JF1/
              HWF;
       IF BWS>0.7*BWF THEN
       BEGIN HWS:=HWS+G3; GOTO WACS
       END
    END ELSE
    BEGIN DCS:=0;
      BCS:=IF DA<24.5 THEN 12.5 ELSE IF DA
           <29.4 THEN 18 ELSE 25;
      ACS:=ACUS/BCS; IF ACS<BCS/8 THEN ACS:
           =#SQRT(ACUS/8);
      DING3 (ACUS, ACS, BCS, WS1, NHS, NBS,
            BWS);
```

```
      HWS: =WS1*(ACS+0.35)/10; HWF: = HW-
           HWS
    END;
    JS: =IA/AS/ACUS; LSAV: =BM1+LA+1.2+PI/
         2*BWS-0.43;
    RS: =RHO*4*P*WS1*LSAV/100/ACUS/AS↑2;
    PCUS: =IA↑2*RS;
    GCUS: =1.05*4*P*WS1*LSAV*ACUS*GAMA*₁₀-5
  END;
L08:FOR J: =1 STEP 1 UNTIL 48 DO
  BEGIN DCF: =DB[J]; ACUF: =0.7854*DCF↑2;
    IF: =JF1*ACUF; WF: =FF÷IF; IF: =FF/WF;
    DING1(ACUF,DCF,WF,NHF, NBF,HWF,BWF);
    LFAV: =BM1+LA+1.2+PI/2*BWF-0.43;
    RF: =RHO*4*P*WF*LFAV/100/ACUF;
    KF: =IF UF=0 THEN UN/RF/IF ELSE UF/RF
         /IF;
    IF KF>KF1 THEN GOTO WJF
  END;
WJF:JF: =IF/ACUF; PCUF: =IF UF=0 THEN
          UN*IF ELSE UF*IF;
  GCUF: =1.05*4*P*WF*LFAV*ACUF*GAMA*₁₀-5;
L09: IF XI1=2∧UF=0 THEN
  BEGIN G1: =0.9*FF; G2: =1.3*FF;
WFF:FF: =(G1+G2)/2; LAG(14, FF,FI,PHII,PHI1);
    PHI2: =KF*FF/WF*RF*60*A*₁₀8/P/N/NN;
    IF ⫲ABS (G2-G1)>1 THEN
```

```
  BEGIN IF PHI2<PHI1 THEN G1: =FF ELSE G2:
          = FF; GOTO WFF
  END
END;
LAG(14, FF, FI, PHII, PHI1);
DELN: =IF XI1=1 THEN PHI/PHI1*(UN-2)/EA
        -1 ELSE PHI1/PHI*EA/UN-1;
EA: =IF XI1=1 THEN UN-IA*(RA+RK+RS)-
      2 ELSE UN+IA*(RA+RK+RS)+2;
KE: =EA/UN; F: =P*NN/60;
BT2: =IF XI3≠3 THEN BT ELSE PI*(DA-HS)/
      Z-B1;
BTA2: =BTA*BT/BT2; GFET: =Z*BT2*HS*LA*0.93
        *7.8*₁₀-3;
GFEJ: =PI/4*((DA-2*HS)↑2-DIA↑2-NV*DV↑2)
        *LA*0.93*7.8*₁₀-3;
G1: =IF XI3≠3 THEN 1700 ELSE 1300;
G2: =IF XI3≠3 THEN 2200 ELSE 1700;
PFET: =F*(100+F)/G1*(BTA2/10000)↑2*GFET;
PFEJ: =F*(200+F)/G2*(BJA/10000)↑2*GFEJ;
PFB: =0.392*BB*LB*VK*NB*2*P;
PB: =2*IA; PAD: =10*PN;
SIGP: =PCUA + PCUK + PCUF + PCUS + PFET +
        PFEJ+PFW+PFB+PB+PAD;
ETA: =PN/(PN+SIGP*₁₀-3);
IF #ABS(IF/IF0-1)>0.01 ∨ #ABS(KE-KE0)>
   0.002 ∨ #ABS(ETA-ETA0)>0.001 THEN
```

```
BEGIN IF0: =IF; KE0: =KE; ETA0: =ETA; GOTO
      L02
END;
#PRINT (0, '5/, 10X, 4HPHII, 12X, 3HBDI, 14 X,
      2HFI, 11X, 4HFDTI, /');
#PRINT(0, 'L4I15', PHII, BDI, FI, FDTI);
#PRINT(0, '2/, 7X, 3HIN=, F10.3, 7X, 3HIA=,
  F10.3, 7X, 3HIF=, F10.3, 5X, 5HDELN=, F10.5,
  6X, 4HETA=, F10.5, 5X, 5HPCUA=, F10.1, 5X,
  5HPCUK=, F10.1, 5X, 5HPCUF=, F10.1, 5X,
  5HPCUS=, F10.1, 5X, 5HPFET=, F10.1, 5X,
  5HPFEJ =, F10.1, 6X, 4HPFW =, F10.1, 6X,
  4HPFB=, F10.1, 7X, 3HPB=, F10.1, 6X, 4HPAD
  =, F10.1, 7X, 3HRA =, F10.5, 7X, 3HRK =,
  F10.5, 7X, 3HRF=, F10.5, 7X, 3HRS=, F10.5,
  5X, 5HGCUA=, F10.3, 5X, 5HGCUK=, F10.3,
  5X, 5HGCUF=, F10.3, 5X, 5HGCUS=, F10.3,
  7X, 3HAA=, F10.3, 5X, 5HAAJA =, I10, 7X,
  3HJA=, F10.3, 7X, 3HJK=, F10.3, 7X, 3HJF=,
  F10.3, 7X, 3HJS=, F10.3, 7X, 3HJB=, F10.3,
  6X, 4HPHI=, I10, 7X, 3HBD=, I10, 6X, 4HBTA=,
  I10, 6X, 4HBJA=, I10, 7X, 3HBM=, I10, 7X,
  3HBJ=, I10, 7X, 3HFD=, F10.3, 6X, 4HFTA=,
  F10.3, 6X, 4HFJA=, F10.3, 7X, 3HFM=, F10.3,
  7X, 3HFJ =, F10.3, 7X, 3HFN =, F10.3, 5X,
  5HFAQD=, F10.3, 6X, 4HBDK=, I10, 7X, 3HEX=,
  F10.5, 6X, 4HTHE=, F10.5, 6X, 4HKKN=,
```

F10.5, 5X, 5HUKAV =, F10.3, 7X, 3HKF=, F10.5, 7X, 3HKE=, F10.5, 7X, 3HKD=, F10.5, 6X, 4HKDK=, F10.5, 7X, 3HVA=, F10.3, 7X, 3HVK=, F10.3, 7X, 3HLA=, F10.3, 8X, 2HZ=, I10, 8X, 2HU =, I10, 7X, 3HH0=, F10.3, 7X, 3HB0=, F10.3, 7X, 3HH1=, F10.3, 7X, 3HB1=, F10.3, 7X, 3HH2=, F10.3, 8X, 2HR=, F10.3, 7X, 3HWA=, F10.3, 8X, 2HN=, I10, 6X, 4HNCA =, I10, 6X, 4HDCA=, F10.3, 6X, 4HACA=, F10.3, 6X, 4HBCA=, F10.3, 5X, 5HLAAV=, F10.3, 7X, 3HNB=, I10, 7X, 3HAK=, I10, 6X, 4HWK1=, I10, 6X, 4HNHK=, I10, 6X, 4HNBK=, I10, 6X, 4HDCK=, F10.3, 6X, 4HACK=, F10.3, 6X, 4HBCK =, F10.3, 5X, 5HLKAV=, F10.3, 6X, 4HHWK=, F10.3, 6X, 4HBWK=, F10.3, 7X, 3HWF=, I10, 6X, 4HNHF=, I10, 6X, 4HNBF=, I10, 6X, 4HDCF=, F10.3, 5X, 5HLFAV=, F10.3, 6X, 4HHWF=, F10.3, 6X, 4HBWF=, F10.3, 7X, 3HAS=, I10, 6X, 4HWS1=, I10, 6X, 4HNHS=, I10, 6X, 4HNBS=, I10, 6X, 4HDCS=, F10.3, 6X, 4HACS =, F10.3, 6X, 4HBCS =, F10.3, 5X, 5HLSAV =, F10.3, 6X, 4HHWS =, F10.3, 6X, 4HBWS=, F10.3, IN, IA, IF, DELN, ETA, PCUA, PCUK, PCUF, PCUS, PFET, PFEJ, PFW, PFB, PB, PAD, RA, RK, RF, RS, GCUA, GCUK, GCUF, GCUS, AA, AAJA, JA, JK, JF, JS, JB, PHI, BD, BTA, BJA, BM, BJ, FD, FTA, FJA, FM, FJ, FN,

```
    FAQD, BDK, EX, THE, KKN, UKAV, KF, KE,
    KD, KDK, VA, VK, LA, Z, U, H0, B0, H1, B1,
    H2, R, WA, N, NCA, DCA, ACA, BCA, LAAV,
    NB, AK, WK1, NHK, NBK, DCK, ACK, BCK,
    LKAV, HWK, BWK, WF, NHF, NBF, DCF, LFAV,
    HWF, BWF, AS, WS1, NHS, NBS, DCS, ACS,
    BCS, LSAV, HWS, BWS)
  END;
  GOTO L01
END 55…5 止
```

二、程序的使用说明

关于程序的使用，主要要了解输入数据和输出数据的安排以及上机操作时的注意点。

输入数据分两组。一组是表格、曲线，如表 9-1 所示；另一组是计算对象已知数据，见表 9-2。

程序使用时，为了避免在每次计算时不必要地重复输入表格、曲线，可在表格，曲线的输入语句和计算对象已知数据的输入语句之间插入停机语句，并且在计算结束后用转向语句转到这一停机语句。这样，当需要计算多个规格时，只需要在开始时输入表格、曲线，此后每启动机器一次，就直接输入一个规格的已知数据并运算一次。这是上机操作时要注意的。

输出数据分三组。第一组是把输入的计算对象已知数据重复输出，以便检验数据穿孔是否正确，并作为留底；第二组是空载特性，包括每极主磁通数组 PHI，气隙磁通密度数组 BDI，每极磁动势数组 FI 和气隙磁动势与齿磁动势之和数组 FDTI；第三组是方案计算结果，见表 9-3。

表 9-1　输入的表格、曲线

表格、曲线种类	对应数组	表格来源或数据
绝缘圆线的导线直径 d 表	DB[1:48]	附录 I，表 I-1
绝缘扁线的导线厚度 a 表	A1B[1:25]	附录 I，表 I-4
绝缘扁线的导线宽度 b 表	B1B[1:12]	①附录 I，表 I-4
裸扁线的导线厚度 a 表	A2B[1:29]	附录 I，表 I-5
裸扁线的导线宽度 b 表	B2B[1:11]	附录 I，表 I-5
D_{23} 硅钢片磁化曲线的 H 表	HAB[1:25]	②附录 II，表 II-1
DT_1 电工钢片磁化曲线的 H 表	HM1B[1:20]	附录 II，表 II-2
普通磁极钢片磁化曲线的 H 表	HM2B[1:20]	附录 II，表 II-3
铸钢和厚钢板磁化曲线的 H 表	HJB[1:16]	附录 II，表 II-4
以上四表对应的 B 表	BXB[1:25]	1000，2000，…，25000
气隙磁密 B_δ 与 D_a 关系的 B_δ 表	BDB[1:5]	6700，7700，8300，8800，9250
槽高 h_s 与 D_a 关系的 h_s 表	HSB[1:5]	1.8，2.33，2.7，3，3.23
以上两表对应的 D_a 表	DAB[1:5]	10，15，20，25，30
并励电流与电枢电流比 k_I 与 P_N 关系的 k_1 表	KIB[1:9]	0.065，0.057，0.049，0.038，0.031，0.023，0.015，0.009，0.005
电动机压降系数 k_{E1} 与 P_N 关系的 k_{E1} 表	KE1B[1:9]	0.853，0.867，0.88，0.896，0.906，0.918，0.93，0.937，0.94
发电机压降系数 k_{E2} 与 P_N 关系的 k_{E2} 表	KE2B[1:9]	1.133，1.121，1.11，1.095，1.084，1.076，1.065，1.06，1.06
效率 η 与 P_N 关系的 η 表	ETAB[1:9]	0.7，0.74，0.78，0.82，0.844，0.863，0.883，0.894，0.9
以上四表对应的 P_N 表	PNB[1:9]	0.5，1，2，5，10，20，50，100，200

① 绝缘扁线和裸扁线的 b 表中只取与所有 a 值都能对应到 S 值的 b 值；

② 各磁化曲线的 H 表中只取对应 B 值为 1000，2000，… 的 H 值。

表 9-2 输入的计算对象已知数据

名　　称	对应简单变量	单 位	说　　明	实例
电机运行方式信息	XI1		XI1=1—电动机 XI1=2—发电机	1
电枢绕组型式信息	XI2		XI2=1—单波 XI2=2—单叠 XI2=3—单蛙	2
电枢槽型信息	XI3		XI3=1—梨形 XI3=2—圆底 XI3=3—矩形	3
换向极和串励绕组线型信息	XI4		XI4=1—圆线 XI4=2—扁线 XI4=3—裸扁线	3
磁极材料信息	XI5		XI5=1—DT_1 钢片 XI5=2—普通钢片	2
定子绕组材料信息	XI6		XI6=1—铜 XI6=2—铝	2
额定功率	PN	千 瓦		125
额定电压	UN	伏		220
他励电压	UF	伏	对于非他励电机，UF=0	0
额定转速	NN	转/分		1500
电压或转速变化率	DELN1		无串励绕组时，DELN1=−1	0.0695
极对数	P			2
电枢外径	DA	厘 米		29.4
电枢内径	DIA	厘 米		9

(续)

名　　称	对应简的变量	单 位	说　　明	实例
电枢长度下限	LA1	厘 米		25.5
电枢长度上限	LA2	厘 米	只计算一种电枢长度时，LA2=LA1	25.5
轴向通风孔直径	DV	厘 米	无轴向通风孔时,DV=0; 通风孔为半圆形时，取半径值	1.5
轴向通风孔个数	NV		无轴向通风孔时,NV=0; 通风孔为半圆形时，取加倍值	40
槽数	Z		矩形槽开槽计算时，Z=0	0
每槽虚槽数	U		矩形槽开槽计算时，u 取 W_a	1
槽口高	H0	厘 米		0.5
槽口宽	B0	厘 米	矩形槽开槽计算时 B0=0	0
槽口下小梯形高或半圆半径	H1	厘 米	开槽计算时，H1=0 对于矩形槽，H1=0	0
槽身梯形上边宽	B1	厘 米	开槽计算时，B1=0 对于矩形槽，B1=B0	0
槽身梯形高	H2	厘 米	开槽计算时，H2=0	0
槽底半圆半径	R	厘 米	开槽计算时，R=0 对于矩形槽，R=0	0
机座外径	DJ	厘 米		61.5
机座内径	DIJ	厘 米		53.5
机座长与电枢长之差	DELJA	厘 米		20.5

（续）

名　　称	对应简单变量	单 位	说　　明	实例
计算极弧系数	ALP			0.68
主极极身宽	BM1	厘 米		11.2
主极绕组高	HW	厘 米	绕组外包绝缘、绕组间绝缘及框架厚度不计在内	8.8
换向极极身长	LMK	厘 米		24
换向极极身宽	BMK	厘 米		3.8
换向极绕组高	HWK	厘 米	绕组外包绝缘及框架厚度不计在内	8.8
气隙	DEL	厘 米	气隙不均匀时，DEL取等效值	0.315
换向极气隙	DELK	厘 米		0.6
换向器直径	DK	厘 米		20
电刷宽度	BB	厘 米		2
电刷长度	LB	厘 米		3.2
电枢绕组电流密度	JA1	安/毫米^2	非开槽计算时，JA1=0	7.05
换向极绕组电流密度	JK1	安/毫米^2		3.47
并励或他励绕组电流密度	JF1	安/毫米^2		1.83
机械损耗	PFW	瓦		930

表 9-3 输出的方案计算结果

名 称	符号	实 例	名 称	符 号	实 例
额定电流	IN	619	电枢绕组电阻	RA	0.00825
电枢电流	IA	615	换向极绕组电阻	RK	0.00381
并励电流	IF	4.16	并励绕组电阻	RF	43.4
电压或转速变化率	DELN	0.0812	串励绕组电阻	RS	0.00115
效率	ETA	0.918	电枢绕组铜重	GCUA	26.7
电枢绕组铜耗	PCUA	3120	换向极绕组铜重	GCUK	11.1
换向极绕组铜耗	PCUK	1443	并励绕组铜重	GCUF	18.3
并励绕组铜耗	PCUF	814	串励绕组铜重	GCUS	3.72
串励绕组铜耗	PCUS	437	电负荷	AA	380
电枢齿铁耗	PFET	536	热负荷	AAJA	2692
电枢轭铁耗	PFEJ	479	电枢绕组电流密度	JA	7.09
机械损耗	PFW	930	换向极绕组电流密度	JK	3.27
电刷摩擦损耗	PFB	788	并励绕组电流密度	JF	1.83
电刷电气损耗	PB	1230	串励绕组电流密度	JS	3.10
附加损耗	PAD	1250	电刷电流密度	JB	9.61

(续)

名　称	符号	实　例	名　称	符　号	实　例
每极额定主磁通	PHI	3.68×10^{6}	换向极与电枢反应磁动势比	THE	1.12
气隙磁通密度	BD	9200	换向区域与中性区域宽度比	KKN	0.782
电枢齿磁通密度	BTA	18400	片间电压平均值	UKAV	7.72
电枢轭磁通密度	BJA	13000	励磁余量	KF	1.22
主磁极磁通密度	BM	16300	压降系数	KE	0.954
机座轭磁通密度	BJ	12000	主磁极气隙系数	KD	1.12
气隙磁动势	FD	2594	换向极气隙系数	KDK	1.07
电枢齿磁动势	FTA	432	电枢周速	VA	23.1
电枢轭磁动势	FJA	50	换向器周速	VK	15.7
主磁极磁动势	FM	558	电枢长度	LA	25.5
机座轭磁动势	FJ	292	槽数	Z	38
每极额定磁动势	FN	4927	每槽虚槽数	U	3
电枢反应去磁磁动势	FAQD	733	槽口高	H0	0.5
换向极气隙磁通密度	BDK	2014	槽口宽	B0	0.781
电抗电动势	EX	2.17	槽口下小梯形高或半圆半径	H1	0

(续)

名　称	符号	实　例	名　称	符　号	实　例
槽身梯形上边宽	B1	0.781	换向极绕组导线直径	DCK	0
槽身梯形高	H2	2.706	换向极绕组导线厚度	ACK	4.75
槽底半圆半径	R	0	换向极绕组导线宽度	BCK	20
电枢每元件匝数	WA	1	换向极绕组平均半匝长	LKAV	32.5
电枢导体数	N	228	换向极绕组高度	HWK	8.8
电枢导体并绕根数	NCA	2	换向极绕组宽度	BWK	2
电枢绕组导线直径	DCA	0	并励绕组匝数	WF	825
电枢绕组导线厚度	ACA	2	并励绕组每层匝数	NHF	39
电枢绕组导线宽度	BCA	5.6	并励绕组层数	NBF	22
电枢绕组平均半匝长	LAAV	57.8	并励绕组导线直径	DCF	1.7
每电刷杆的电刷数	NB	5	并励绕组平均半匝长	LFAV	43.1
换向极绕组并联支路数	AK	2	并励绕组高度	HWF	7.06
换向极绕组每极匝数	WK1	16	并励绕组宽度	BWF	3.58
换向极绕组每层匝数	NHK	16	串励绕组并联支路数	AS	2
换向极绕组层数	NBK	1	串励绕组每极匝数	WS1	4

（续）

名　称	符号	实　例	名　称	符　号	实　例
串励绕组每层匝数	NHS	4	串励绕组导线宽度	BCS	25
串励绕组层数	NBS	1	串励绕组平均半匝长	LSAV	41.4
串励绕组导线直径	DCS	0	串励绕组高度	HWS	1.74
串励绕组导线厚度	ACS	4	串励绕组宽度	BWS	2.5

三、程序中符号的意义

在源程序中所用到大量符号，表示简单变量、数组和过程名。大部分简单变量和全部数组属于输入数据和输出数据，其意义已在前面说明。现将其余简单变量和所有过程名的意义叙述于下。这些简单变量的意义见表 9-4。

下面对所有过程名加以说明：

LAG——一元三点拉格朗日插值法。此过程的形式参数 n 是插值节点个数，x 和 y 分别是插值节点及其函数值，u 和 v 分别是插值点及其函数值。

JIFEN——梨形槽或圆底槽槽身漏磁导系数的梯形法数值积分。

DIAN1——采用绝缘圆线的电枢绕组线规计算。

DIAN2——采用绝缘扁线的电枢绕组线规计算。

DING1——采用绝缘圆线的定子绕组尺寸和排列计算。

DING2——采用绝缘扁线的定子绕组尺寸和排列计算。

DING3——采用裸扁线的定子绕组尺寸计算。

表 9-4 其余简单变量的意义

符号	意义	符号	意义
PI	圆周率 π	ACUA	电枢绕组导体截面积 A_{Cua}
XI7	信息量，开槽为 1，不开槽为 2	NS	每槽导体数 N_s
PK	换向极极对数 p_k	DI	绝缘圆线直径
TAU	极距 τ	AI	绝缘扁线厚度
BP	主磁极极弧计算长度 b'_p	BI	绝缘扁线宽度
TA	齿顶处的齿距 t_a	Y1T	电枢绕组第一齿节距 y_{1t}
TA3	1/3 齿高处的齿距 $t_{a1/3}$	EPSK	线圈节距缩短虚槽数 e_K
HS	槽高 h_s	TK	换向器片节距 t_K
S	槽身截面积	BET	电刷覆盖系数 β
SR	槽身下半圆截面积	BK	换向区域宽度 b_K
BT	计算齿宽 b_t 或 $b_{t1/3}$	BN	中性区域宽度 b_n
Z1	槽数下限	LAMS	槽漏磁导系数 λ_s
Z2	槽数上限	LAMT	齿顶漏磁导系数 λ_t
U1	每槽虚槽数下限	LAME	端部漏磁导系数 λ_E
U2	每槽虚槽数上限	KBET	互感短距系数 k_β
DU	每槽虚槽数增量	XI	平均漏磁导系数 ξ
K	换向器片数 K	WDK	换向极绕组匝数分量之一
N1	电枢导体数预计值	WAQ	换向极绕组匝数分量之一
EPS	N1 和 N 的最大相对误差	WK	换向极绕组匝数 W_K
A	并联支路对数 a	ACUK	换向极绕组导体截面积 A_{CuK}
EA	电枢绕组感应电动势 E_a	RHO	定子绕组导线电阻率 ρ

（续）

符号	意　　义	符号	意　　义
GAMA	定子绕组导线比重 γ	WS	串励绕组匝数 W_s
KT	齿宽系数 k_t	ACUS	串励绕组导体截面积 A_{Cus}
KS	槽部校正系数 k_s	FF	并励绕组磁动势 F_f
LTA	电枢齿磁路长度 L_{ta}	ACUF	并励绕组导体截面积 A_{Cuf}
HJA	电枢轭计算高度 h'_{ja}	BT2	1/2 齿高处齿宽 $b_{t1/2}$
AJA	电枢轭截面积 A_{ja}	F	频率或积分值
LJA	电枢轭磁路长度 L_{ja}	GFET	电枢齿铁重 G_{Fet}
AM	主磁极截面积 A_m	GFEJ	电枢轭铁重 G_{Fej}
LM	主磁极磁路长度 L_m	SIGP	总损耗 ΣP
AJ	机座轭截面积 A_j	BD1	气隙磁通密度预计值
LJ	机座轭磁路长度 L_j	KF1	励磁余量预计最低值
BTA1	电枢齿磁通密度计算值 B'_{ta}	KI	并励电流与电枢电流比值
BTA2	电枢 1/2 齿高处磁通密度 $B_{ta1/2}$	IF0	并励电流假定值
HT	电枢齿磁场强度 H_{ta}	KE0	压降系数假定值
HA	电枢轭磁场强度 H_{ja}	ETA0	效率假定值
HM	主磁极磁场强度 H_m	I	工作单元
HJ	机座轭磁场强度 H_j	J	工作单元
PHI1	工作单元	G1	工作单元
PHI2	工作单元	G2	工作单元
FDT	气隙和电枢齿磁动势之和	G3	工作单元
FS	串励绕组磁动势 F_s		

四、关于源程序的一些解释

为了便于阅读源程序，下面对源程序作一些扼要的解释。

在程序开头的说明部分中，有 7 个过程说明，解释如下。

第 1 个过程是一元三点插值法过程 LAG，其原理和用途见 9-2 节。

第 2 个过程是槽身漏磁导系数的梯形法数值积分过程 JIFEN，其原理和用途也见 9-2 节。其中 G1 即 x 高度处的槽宽 b_x，G2 即 x 高度以下的槽面积 S_x，F 即用数值积分法得到的槽身漏磁导系数。

第 3 个过程是采用绝缘圆线的电枢绕组线规计算过程 DIAN1。其计算步骤为：槽净面积 AS→ 并绕根数 NCA 和绝缘线直径 DI→ 导线绝缘厚度 G1→ 导线直径 DCA 并按线规表调整 → 导线截面积 ACUA。其中 NCA 和 DI 的确定办法是：取 NCA＝1、2、3、…，逐次计算 DI，如 DI⩽1.7 毫米，则此时的 NCA 和 DI 即为确定值。

第 4 个过程是采用绝缘扁线的电枢绕组线规计算过程 DIAN2。其计算步骤为：绝缘线厚度 AI→ 绝缘线宽度 BI 和并绕根数 NCA→ 导线厚度方向绝缘厚度 G1→ 导线厚度 ACA 并按线规表调整 → 导线宽度方向绝缘厚度 G1→ 导线宽度 BCA 并按线规表调整 → 导线截面积 ACUA。其中在确定 BI 时，注意到对于单蛙绕组（即 XI2＝3 时），在矩形槽的槽高方向上放 4WA 根导体，而对于其它绕组则只放 2WA 根导体。此外，当 BI>8 毫米时，要分成 2 根导体并绕。

第 5 个过程是采用绝缘圆线的定子绕组尺寸和排列计算过程 DING1。它应用于采用绝缘圆线的换向极绕组、串励绕组和并励（或他励）绕组的计算。其计算步骤为：导线直径 DC 并按线规表调整→导线绝缘厚度 G1→绝缘线直径 DI→导线

截面积 ACU→ 松散系数 G1→ 绕组每层匝数 NH→ 绕组层数 NB→ 绕组宽度 BW。

第 6 个过程是采用绝缘扁线的定子绕组尺寸和排列计算过程 DING2。它应用于采用绝缘扁线的换向极绕组和串励绕组的计算。其计算步骤为：导线厚度 AC 并按线规表调整 → 导线厚度方向绝缘厚度 G1→ 绝缘线厚度 AI→ 导线宽度 BC 并按线规表调整 → 导线宽度方向绝缘厚度 G1→ 绝缘线宽度 BI→ 导线截面积 ACU→ 松散系数 G1→ 绕组每层匝数 NH→ 绕组层数 NB→ 绕组宽度 BW。其中 BC 与 AC 之比控制为 3.5 左右。

第 7 个过程是采用裸扁线的定子绕组尺寸和排列计算过程 DING3。它应用于采用裸扁线的换向极绕组和串励绕组的计算。这个过程的计算步骤比较简单，因为导线是扁绕的，NH＝W，NB＝1。

接下来是计算部分。先输入表格、曲线的数据，经过一次停机，再输入计算对象的已知数据，并重复打印一遍。接着计算一些常数，如圆周率 PI、换向极极数 PK、极距 TAU、极弧长度 BP、并联支路对数 A 等，并用插值法由经验曲线决定气隙磁密的预计值 BD1 和并励(或他励)电流、压降系数、效率的假定值 IF0、KE0、ETA0、以及决定励磁余量的最低值 KF1。

在上述准备工作完成以后，对于电枢长度 LA 从其下限 LA1 开始到上限 LA2 为止作多方案的计算。

在标号 L02 之后，先计算额定电流 IN、电枢电流 IA、感应电动势 EA、每极主磁通 PHI 和电枢导体数的预计值 N1。然后判别是否要由程序决定槽数 Z 和每槽虚槽数 U。当须作开槽计算且为矩形槽(即 XI7＝1∧XI3＝3)时，要求由程序

决定Z和U。决定Z和U的方法如下：首先按电枢直径DA，由经验公式确定最小槽数G1和最大槽数G2。当采用单波绕组时，G1和G2须处理为奇数，且改记为Z1和Z2，Z可在Z1、Z1+2、…、Z2中选择，U可在3和5中选择。当采用单叠、单蛙绕组时，G1和G2须处理为偶数，也改记为Z1和Z2，Z可在Z1、Z1+2、…、Z2中选择，U可在2、3、4中选择。然后对于各种可能的Z和U的组合进行选择，当满足平均片间电压UKAV≤12伏，且电枢导体数N对预计值N1的误差为最小时，这时的Z和U就是选定的值。在决定Z和U的过程中，还计算了K、UKAV、NS、WA、N的值，这些值在不要求决定Z和U的条件下也是要算的。

在标号L03之后，先由电枢导体数N校正每极主磁通PHI和气隙磁密BD，并由Z计算齿距TA。然后判别是否要作开槽计算。当不需要作开槽计算(即XI7=2)时，只要计算线规就行了，算好后转到L04。要作开槽计算时，步骤如下：先由经验曲线初步选取槽高HS，并按齿磁密为18000高斯初步选取齿宽BT。然后计算槽形各部分的尺寸，并计算线规。当电流密度偏小时，缩短槽高重算；当电流密度偏大时，缩小齿宽重算。

在标号L04之后，先算完电枢绕组、换向器和电刷的有关量。其中在计算每电刷杆的电刷数NB时，控制电刷电密JB不超过12安/厘米^2；对于2极电机，NB至少取2。接下来进行换向计算。其中对于梨形槽和圆底槽（当XI2分别等于1和2时），槽漏磁导系数LAMS的计算采用9-2节中介绍的方法。互感短距系数KBET的计算已经还原到原来的算法。换向极绕组的并联支路数AK由电枢电流IA的大小决定，当IA>500安时，取AK=2，否则AK=1。根据换向

极绕组采用线型的不同(当 XI4 分别等于 1、2、3 时), 用不同的方法计算和排列换向极绕组。

从标号 L05 开始是磁路计算。先计算磁路尺寸, 然后计算空载特性, 共取 14 点, 并保留额定点的所有数据。在计算中, 磁化曲线的查取采用插值法。当计算齿磁密 BTA1 超过 18000 高斯时, 采用对分法决定实际齿磁密 BTA, 见 9-2 节。但有时会出现计算齿磁密 BTA1>18000 高斯, 而实际齿磁密 BTA<18000 高斯的情况, 这时 BTA 可取 18000 高斯, 比较合理。G1 是主磁极漏磁系数。

标号 L06 后面是用对分法求取交轴电枢反应去磁磁动势 FAQD。首先确定负载时气隙和电枢齿磁动势之和 F 的取值范围 G1~G2。然后取 F=(G1+G2)/2, 计算其对应的负载时每极主磁通 PHI1。如 PHI1 小于每极额定主磁通 PHI, 则以 F 代 G1, 否则以F代 G2。然后重取 F=(G1+G2)/2, 重复计算, 直到 G1 和 G2 非常接近为止。这时的 F 即为负载时气隙和电枢齿磁动势之和, 将它减去空载时的气隙和电枢齿磁动势之和 FDTI[10], 就得到 FAQD。在计算中, 负载时每极主磁通 PHI1 的计算用数值积分法, 见式(9-6)和(9-7)。

标号 L07 之后是串励绕组计算。当不用串励绕组(即 DELN1=-1)时, 有关串励绕组的量都取零, 这时并励绕组磁动势 FF 取额定磁动势 FN 与交轴电枢反应去磁磁动势 FAQD 之和。使用串励绕组时, 计算步骤如下: 空载时每极主磁通 PHI1→ 并励(或他励)绕组磁动势 FF→ 串励绕组磁动势 FS→ 串励绕组尺寸和排列计算 → 串励绕组其它量的计算。其中串励绕组尺寸和排列计算分采用绝缘圆线、绝缘扁线和裸扁线三种情况(XI4 分别等于 1、2、3)。在前两种情况中, 串励绕组的高度 HWS 先取 Z 匝的高度, 然后计算

串励绕组宽度 BWS 并且与并励绕组宽度 BWF 相比较。如 BWS>0.7BWF，则在 HWS 上加 1 匝的高度，然后重复计算，直到 BWS⩽0.7BWF 为止。当 XI4=3 时，裸扁线的宽度 BCS 由电枢直径 DA 选择，但导线厚度 ACS 不得小于宽度 BCS 的 1/8。

标号 L08 之后是并励(或他励)绕组计算。将导线直径按线规表从小到大取不同值进行计算。导线直径增大，则绕组电阻减小，而励磁余量增大，故励磁余量 KF 随每一次放大导线直径而增大。当 KF 刚超过励磁余量最低值 KF1 时，认为此时的并励(或他励)绕组是合乎要求的，就不再继续加大线规计算下去。

标号 L09 之后是转速变化率(或电压变化率)DELN、压降系数 KE、各种损耗、效率 ETA 的计算。计算后比较并励(或他励)电流、压降系数、效率的计算值和假定值，如误差大于规定值，则作迭代修正。

程序的最后部分是按格式要求打印电磁计算中的空载特性以及所有需要的量。

第十章 通风与散热

10-1 概 述

直流电机运转时产生各种损耗，这些损耗转变为热能，一方面使绕组、铁心等部件的温度升高，另一方面通过电机绕组、铁心和机座表面散逸到周围空气中去。电机发热部分的温度与外部的环境温度之差称为温升。温升有一定的限度，它受绝缘材料耐热性能的限制，如导线的允许温升由导线绝缘材料的耐热程度而定；铁心温升由硅钢片涂覆漆膜和槽绝缘的耐热程度而定。当电机温升超过允许值时，绝缘材料将加速老化而损坏，电机使用寿命也大大缩短。另外，换向器、轴承也有一定的温升限度。为使电机内部的热量容易散发出去，降低电机的温升，通风散热的措施是不可少的。特别是近年来，电机设计中采用了较高的电磁负荷，缩小了体积，使电机的热负荷大为增加，除了采用耐温较高的绝缘材料外，通风散热的重要性也愈加突出。

如果把电机看成一个温度均匀的发热体，那末，在任一时刻内热平衡的微分方程为

$$Q\,dt = cG\,d\theta + \alpha_s A\theta\,dt \tag{10-1}$$

解得在任一时刻的温升 θ 为

$$\theta = \theta_\infty\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \theta_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{10-2}$$

式中 Q——单位时间内产生的热量(瓦)；

G——重量(公斤)；

c——比热[瓦·秒/(公斤·度)]；

α_s——表面散热系数[瓦/(厘米^2·度)]；

A——散热表面积(厘米)^2；

θ——温升(度)；

$\theta_\infty=\dfrac{Q}{\alpha_s A}$——稳定温升(度)；

θ_0——起始温升(度)；

$T=\dfrac{Gc}{\alpha_s A}$——发热时间常数。

式(10-2)所示的关系见图 10-1。但是，在电机中的发热体有多个(如定子绕组，电枢绕组和电枢铁心等)，它们的发热情况不同，温升也不同，彼此之间有热的交换。对每个发热体来说，由于散热条件不同，它的温度也不均匀，例如电枢绕组端部和中间部分的温度就有较大的差别。所以电机的各部分温升不可能用式(10-2)来进行计算。不过，从式(10-2)可以看出电机温升随时间按指数规律变化。从理论上讲，要经过无穷大时间才能到达稳定温升状态，但实际上 $t=(4\sim5)T$ 时温升已很接近稳定值了(当 $t=4T$ 时，$\theta=0.982\,\theta_\infty$)；由于 $T=\dfrac{Gc}{\alpha_s A}$，当 Gc (即电机的热容量)愈大时，或 $\alpha_s A$(即电机的散热量)愈小时，时间常数 T 就愈大，也就是说电机到达稳定温升的时间愈长；由于

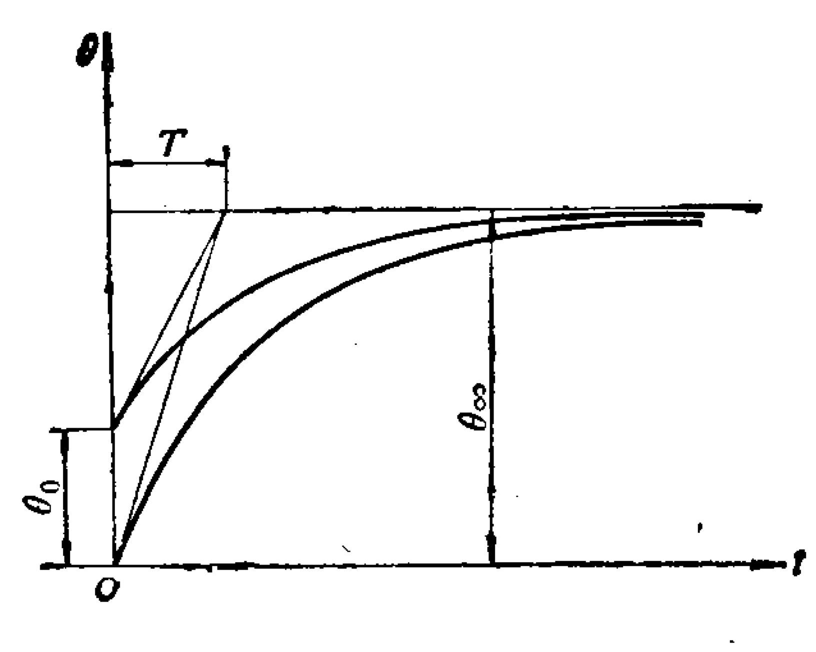


图 10-1 均质固体发热曲线

$$\theta_{\infty}=\frac{Q}{\alpha_s A}$$

就是说电机的稳定温升仅由所产生的热量、散热表面积和表面散热系数确定，而与电机的重量、比热和原来温度无关。这些定性分析将有助于对电机温升变化情况的了解。

电机损耗所产生的热量通过传导到达表面后，以辐射和对流的方式经表面而散逸，加大散热面积 A 和增大表面散热系数 α_s 都有助于降低稳定温升。试验表明，α_s 将随空气吹拂表面的速度的增加而增大，并和散热面的性质有关。空气吹拂表面的速度在电机各部分是不同的，它与风扇的设计和风路的安排有关，定量计算有较大的误差，所以 α_s 也不能准确地求得。因此，在电机的设计和制造时，就要根据经验采用各种有效的通风方式，使各部分的空气量和空气速度分配合理，以收到良好的冷却效果。

还应该指出：表面的稳定温升低于电机内部的稳定温升，其差值是热量从内部传导到表面所造成的温度降。传导的热量与温差 θ 的关系可用下式表示

$$\theta=\frac{Ql}{\lambda A}\text{(度)} \tag{10-3}$$

式中 l——热传导经过的长度(厘米)；

A——热传导经过的面积(厘米^2)；

λ——导热系数(瓦/厘米·度)，见表 10-1。

用式(10-3)虽然可以计算内部和表面的温差，但是由于热流 Q 不容易确定，所以具体进行计算也是困难的，不过，可用以分析温差的大小和降低温差的措施。例如，绝缘材料的 λ 值范围多在 0.002 左右，因此在选择电机绝缘结构时，应保证在耐电压允许的条件下尽量做到厚度小，易于导热，降低

表 10-1　电机常用材料的导热系数

材　　料	导热系数 λ [瓦/(厘米·度)]	材　　料	导热系数 λ [瓦/(厘米·度)]
紫　　铜	3.5	云　母　带	0.0024
铝	2.0	层　压　板	0.001
钢	0.63	浸漆玻璃丝带	0.0022
涂漆硅钢片	0.012	静止薄空气	0.00025

温差；静止薄空气层的 λ 为 0.00025，比一般绝缘材料小了近 10 倍，因此绕组绝缘内应尽量消除空气层，以降低温差金属的导热系数一般为 0.5～3.5 左右，比绝缘材料要大几百倍，但因热传导经过的长度比绝缘厚度大得多，所以在电机中导热的金属也有一定的温度降，这并不总是可以忽略的。

由此可见，电机通风和温升的计算不但复杂，并且不大准确，往往和试验数据有一定的差距。在工厂设计中往往根据经验，按电机负载性质、防护型式和通风方式来控制某些与发热有关的参数，如电负荷、电流密度和磁通密度等，使电机各部分的温升在允许值内。本章主要对通风和温升问题作一些定性分析，先介绍直流电机常用的各种通风系统，然后说明通风系统中风扇的设计以及为有效改善通风散热所采取的各种措施，最后介绍工厂用试制电机的温升试验来推算电机温升的方法。

10-2　直流电机的通风系统

直流电机的通风散热系统，根据技术要求及工作环境的不同可有多种型式。例如从电机的内、外部空气是否连通，可分为防护式和封闭式两类；按电机内部空气的通风路径，可分

为径向、轴向和混合(径轴向均有)三种。

不论哪种通风系统，为了获得良好的冷却效果，在设计电机内部的通风结构时，应该注意的问题是：

(1) 合理分配风量和相应的风速。经过电机各部位的风量及其相应的风速要根据该部位散热的需要，使发热和散热协调平衡，为此要合理布置风路。

(2) 减少风阻，使风路畅通。风路系统应避免涡流、堵塞、漏风等情况。

(3) 尽可能增大发热体的散热面积。相应的措施如电枢铁芯设置径向通风沟、轴向通风道，电枢绕组端部制成阶梯形；并(他)励绕组分成多个线圈，换向极线圈采用架空结构等。

(4) 选择合理的风扇。对于自扇冷式电机，一般来说，功率小、转速低的电机用离心式风扇；功率大，转速高的电机用轴流式风扇。

(5) 控制冷却空气的含尘量。电机内部应防止积聚粉尘，以免导致散热效果下降。同时，尘埃也会使绕组的绝缘性能和换向变坏。对于高速和大型直流电机，有时将换向器和电机的其他部分隔开，分成二条风路。

下面分别介绍几种常见的通风系统。

一、防护式通风系统

小功率防护型直流电机，如Z2、Z3系列的1～6号机座，常用图10-2所示的通风系统。由于电机内部离心式风扇的作用，冷空气从换向器端的端盖风窗吸入，经过换向器表面、定子的极间空腔和空气隙，吹拂换向器、电枢、磁极和换向极绕组等外表面，吸收热量，经过风扇将热空气从前端盖的风窗排出。由于冷空气的主要流向和电机主轴方向并行，因此常

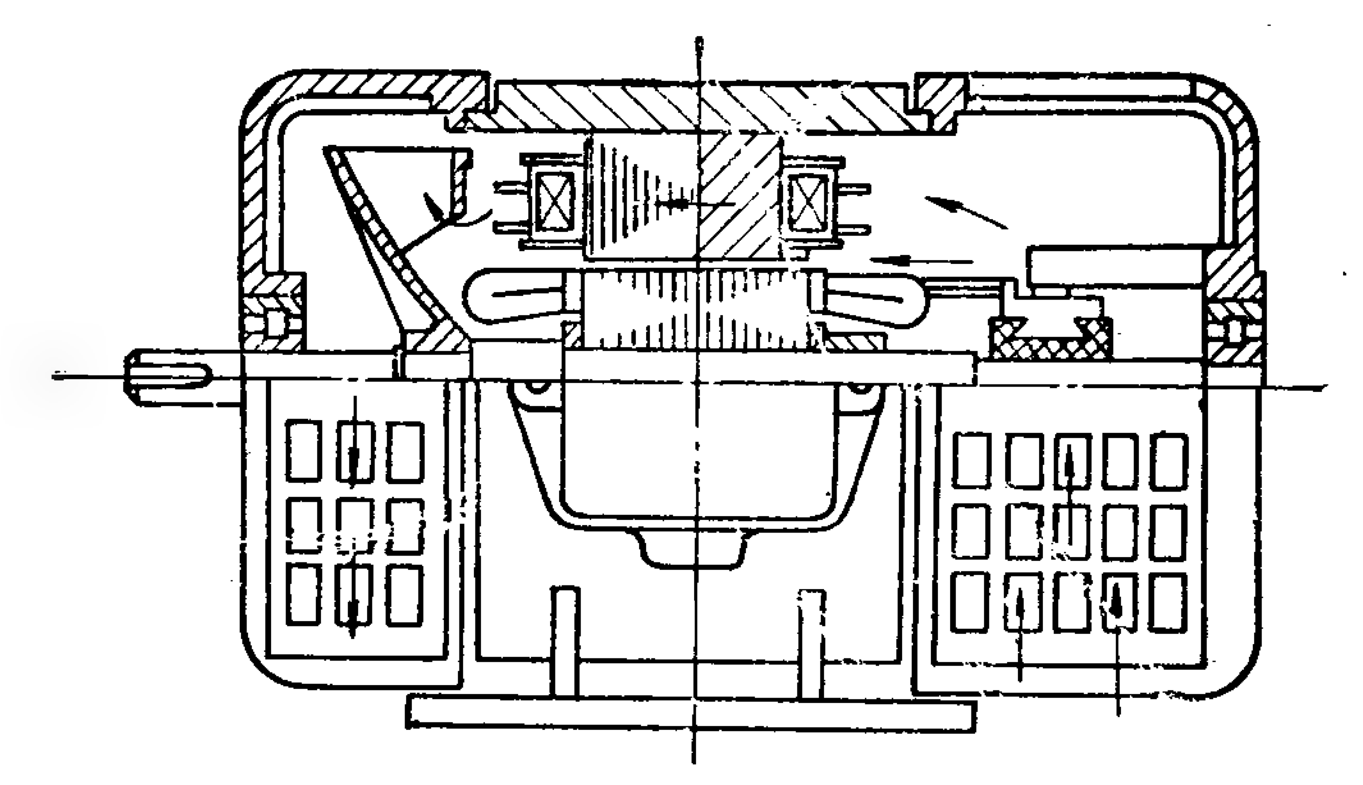


图 10-2 抽风式小型直流电机通风系统

称为轴向通风系统。又由于电机所需要散热的部件都在风扇的进风侧，故也称为抽风式轴向通风系统。这种通风系统有较好的散热效果。另外还要指出，在这种通风系统中，换向器表面的冷却空气温度最低，对换向有利，但缺点是电刷的炭粉容易随冷空气吹到绕组表面，因此要求加强绕组的浸漆工艺，以提高其绝缘性能。

在中小型直流电机中，随着电机功率的增大，还采取了以下措施来加强通风散热。

(1) 电枢铁心冲片的轭部冲有轴向通风孔，见图 10-3.

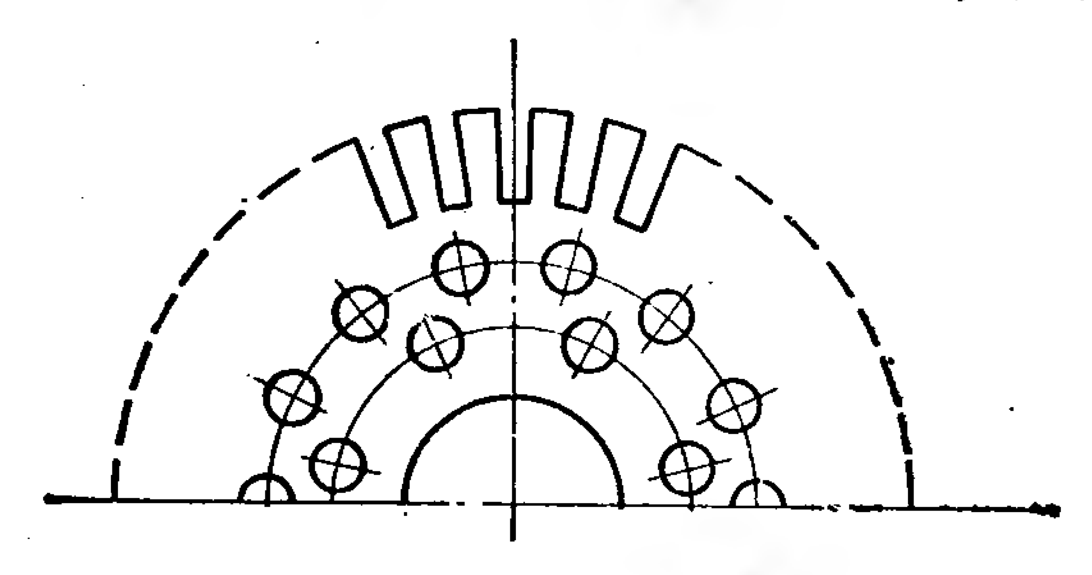


图 10-3 电枢铁芯轴向通风孔

这样，使电枢内部的热量更易散出。通风孔的形状和大小不但要从散热的要求去考虑，还要兼顾轭部磁路截面的合理性，使其磁密在允许范围内。通风孔一般采用圆形或半圆形，单排或双排交叉排列。

(2) 换向器套筒内径与转轴之间有轴向通风道，见图10–4。这样，增加了散热面积，减少了风阻，更利于散热。

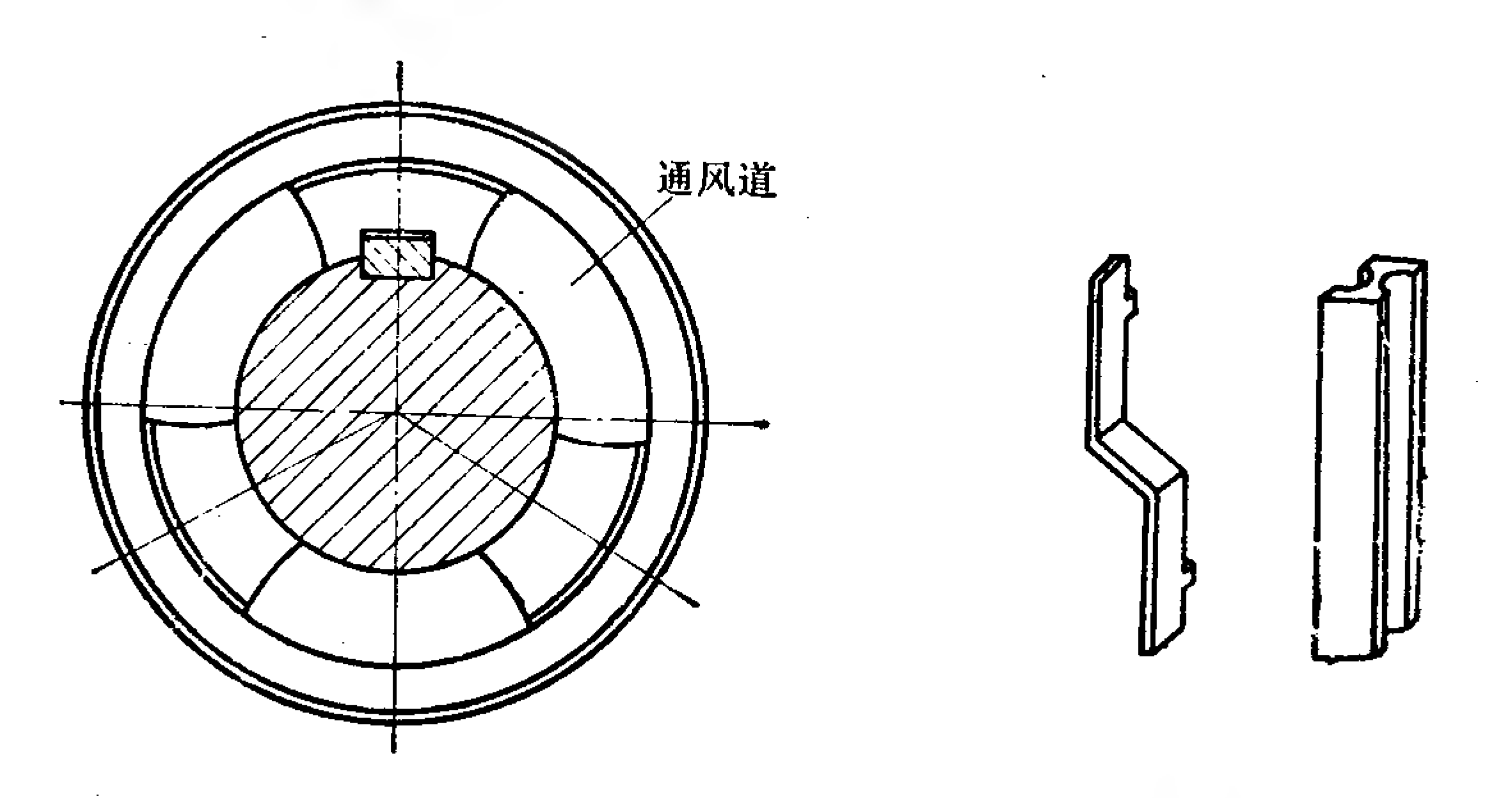


图10–4 换向器套筒上的轴向通风道

图10–5 通风道片

(3) 对于较大的中型直流电机，将电枢铁心叠成多段，段与段之间装有1厘米厚的通风道片，见图10–5，形成径向通风沟。当电枢转动时，通风道片起了离心式风扇叶片的作用，把经由电枢轭部风道的冷空气抽到定子空腔，加强了电枢铁心内部的散热效果。

二、全封闭式通风系统

表面自冷的小型全封闭式直流电机的外型和防护式相似，但端盖没有进出风的风窗，电机内部的空气不能和外界空气交换，损耗产生的热量主要依靠电机内部的空气带到机座及端盖表面进行自然冷却。这种通风系统散热能力很差，在

电机的尺寸相同的条件下，输出功率低$\left(\text{如 ZO2 型的输出功率仅及同机座号 Z2 型的 } \frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}\right)$。但是这种通风系统结构简单，并且在电机转速向下调变时，对温升的影响也较小，常用于小功率电机或非连续定额（如 ZZY 系列）的电机。

表面吹风冷却的全封闭式电机的通风结构见图 10–6。电机的外表面由装在电机后端的离心式风扇吹冷，电机内部也装有风扇，使空气在电机内部强迫循环，热量容易传送到机座表面。这种通风系统的散热能力比表面自冷电机有所提高，对于尺寸相同的电机其输出功率也相对提高，但结构比较复杂。

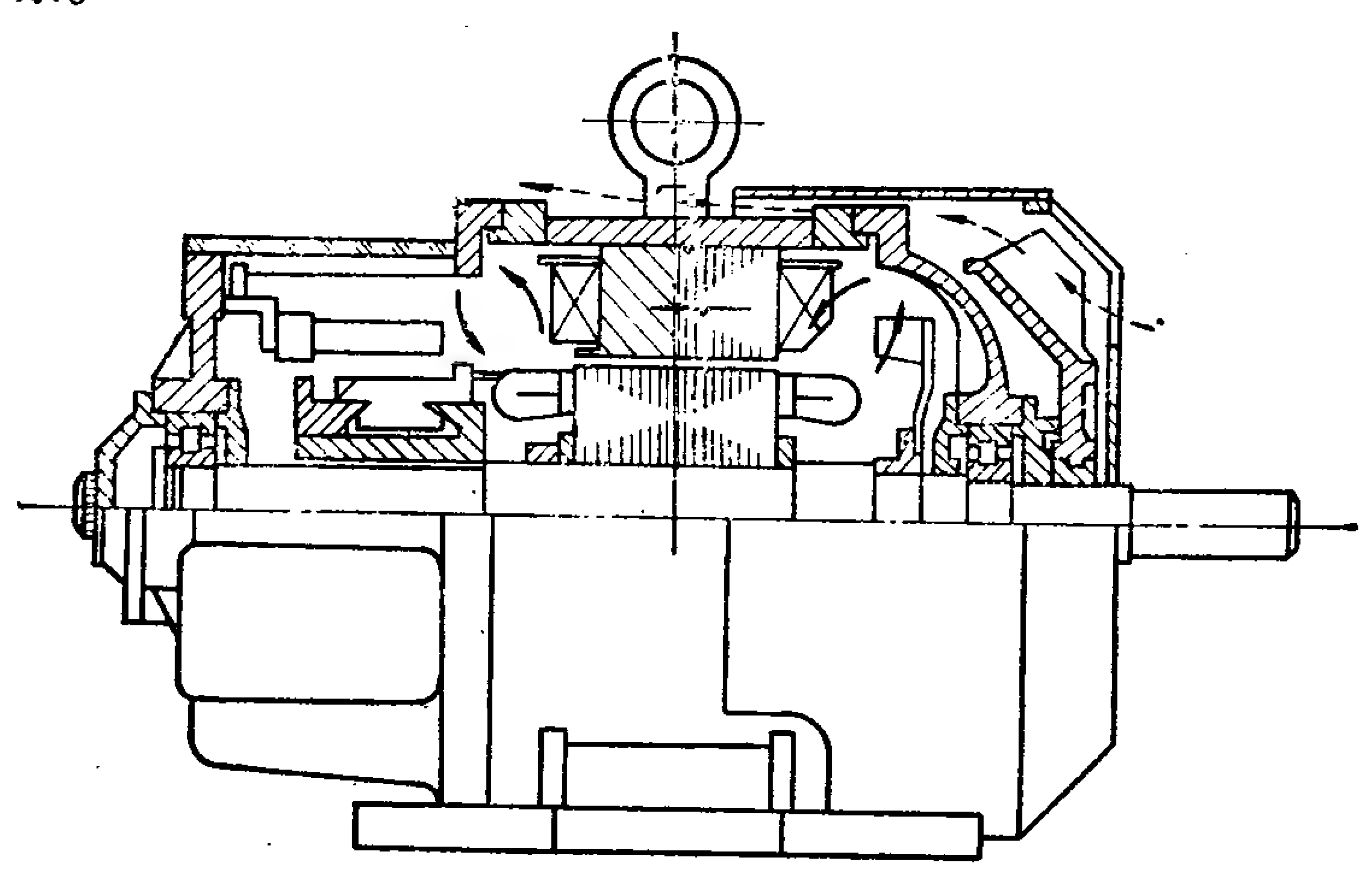


图 10–6　表面吹风冷却的全封闭式电机的通风结构

带冷却器吹冷的封闭式通风系统见图 10–7，常用于 ZO2 系列 8、9 号机。冷却器装在机座上侧，它有内外两路风道，并能相互传热。内风道两端和前后端盖联通，使内部热空气经由内风扇送到冷却器。外风扇将冷却空气经由外风道对冷

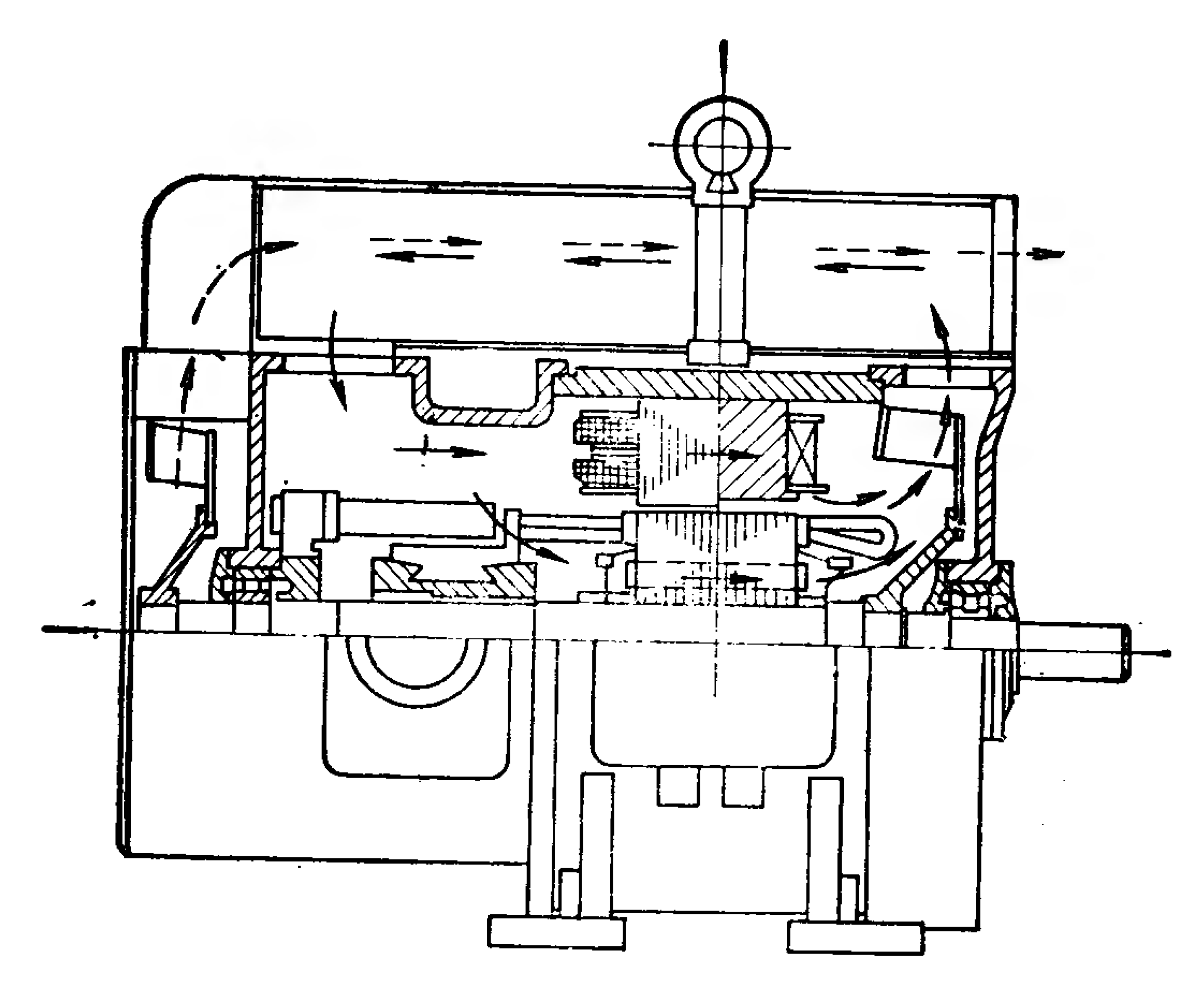


图 10-7 带冷却器吹冷的封闭式通风系统

却器进行吹冷。这种通风系统散热效果好，但结构复杂。

三、外扇冷式通风系统

在上述的各种通风系统中，风扇都由电机本身的转轴驱动，故也称自扇冷式。直流电机另一种通风系统是由独立驱动的鼓风机送入冷却空气，或抽出热空气，使电机强迫通风，带走内部的热量，称为外扇冷式。图 10-8 就是外扇冷式的直流电机，外装的鼓风机是直接骑在电机的上侧，故称骑式外扇冷式。它的主要特点是：当电机转速调变时，风量不变，故在低速运行下，电机也不会过热。所以，这种通风方式适用于广调速的中小型直流电动机。外装的鼓风机除了直接骑在电机上侧外，还可以通过管道联接，驱送冷空气流过电机内部，把热量带走。管道可根据需要在电机进出风两端都安装联接，

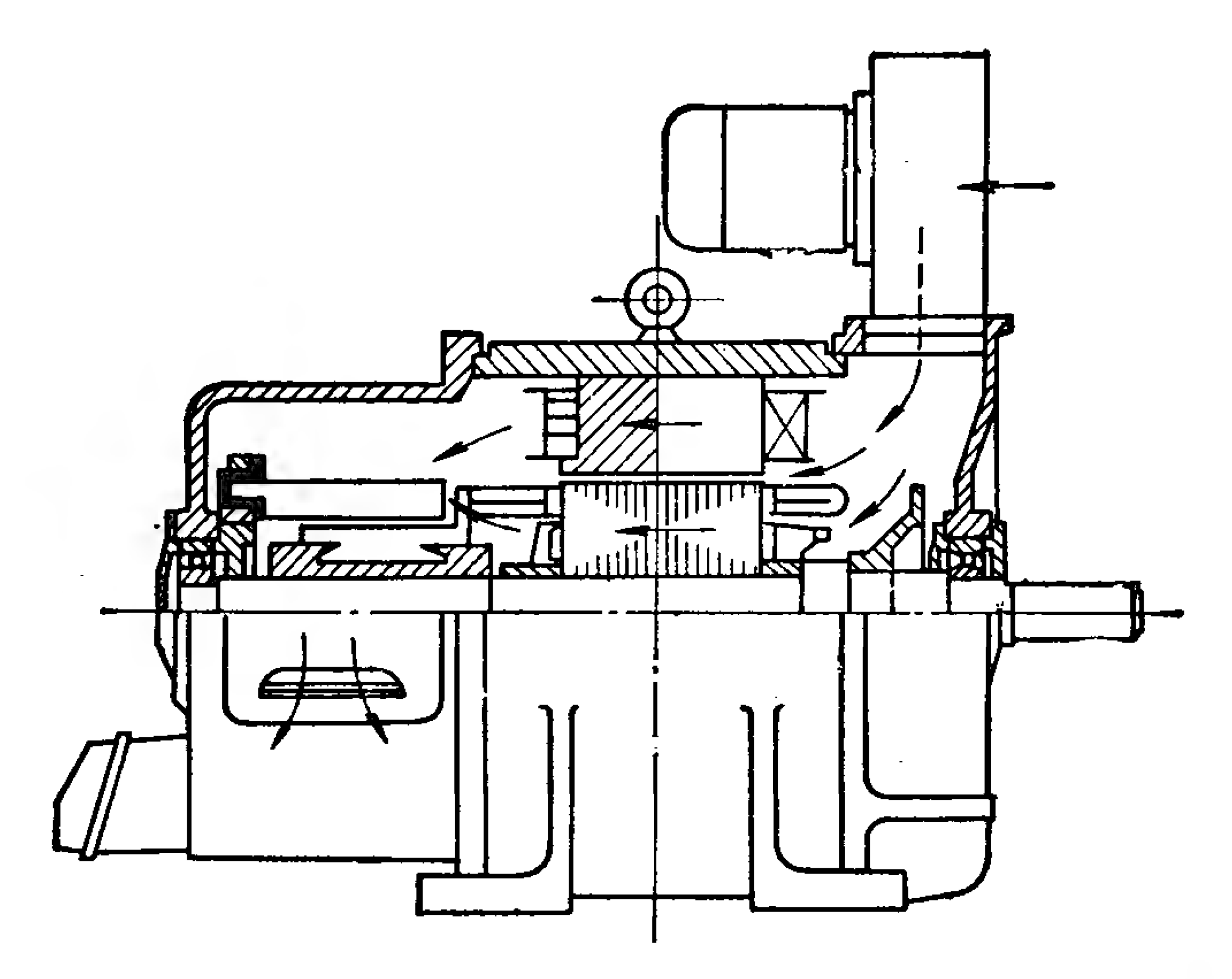


图 10-8　骑式外扇冷式通风系统

或仅在进出风口的任一端联接安装，这种方式称为管道通风式。

10-3　通 风 计 算

直流电机的散热是依靠冷却空气以一定的速度不断吹拂发热体的表面，将热量带走。当电机在额定状态下运行，温升达到稳定值时，冷却空气所带走的全部热量等于电机总损耗所产生的热量。所以，冷却空气的数量，即风量，可根据电机的总损耗来估算

$$Q_A = k\frac{\sum P}{c\theta} \quad (米^3/秒) \qquad (10\text{-}4)$$

式中　Q_A——对电机冷却所需的风量(米³/秒)；

$\sum P$——电机的总损耗(瓦)；

c——空气的比热，在 50°C、标准大气压时，

$c=1.100$ [瓦·秒/(米³·度)]；

θ——电机进出口空气的温差(度)，通常控制在电机绕组温升的 $\frac{1}{4}$ 以内；

k——考虑各部分热量及空气不均匀的系数，一般取 $k=1.3$。

为了保持所需的风量在风路中流过，需有一定的风压。在电机的通风系统中，施于整个风路的全部风压等于各段风路压力损失之和加上风路出口处的动压力。

按照流体动力学的理论，要使空气以速度 v_B 流出某一孔口时所需要的压力，即动压力 H_d，等于

$$H_d=\frac{\gamma}{2g}v_B^2 \quad (公斤/米^2) \tag{10-5}$$

式中 v_B——运动空气的速度(米/秒)；

γ——空气的比重，等于 1.23 公斤/米³；

g——9.81 米/秒²。

风路中的全部风压除了克服动压力外，还要补偿其他的风压损失，如风道入口处的压力损失、风道突然扩大或缩小时的风压损失、风道拐弯处的压力损失以及与风道壁摩擦的压力损失等。

试验表明，风路中的各段风压损失 H 正比于在该段风路中运动空气的动压力 H'_d

$$H=\xi H'_d=\xi\frac{\gamma}{2g}v^2 \quad (公斤/米^2) \tag{10-6}$$

式中 v——在所研究风路中空气的速度(米/秒)；

ξ——在所研究风路上的风阻系数，它为常数，其值可由试验求得。

在式(10-6)中，将 v 用 $\frac{Q_A}{S}$ 代入，可得

$$H=\xi\frac{\gamma}{2g}\frac{Q_A^2}{S^2} \tag{10-7}$$

式中 Q_A——在所研究风路上的风量(米³/秒)；

S——在所研究风路上的截面(米²)。

令

$$Z=\frac{\xi}{S^2}\frac{\gamma}{2g} \tag{10-8}$$

那末

$$H=ZQ_A^2 \tag{10-9}$$

Z 称为该段风路的风阻，对于空气介质

$$Z=\frac{\xi}{S^2}62\times10^{-3}\quad(\text{公斤}\cdot\text{秒}^2\cdot\text{米}^{-8}) \tag{10-10}$$

它等于在一秒钟内，驱送 1 米³的空气通过该风路所需要的压力。

式(10-9)就是在任一段风路中风压与风量的关系式。各段风路的风阻不同，它不但取决于风路的几何尺寸，也与不同风路的风阻系数 ξ 有关。各种通风道的风阻系数见表 10-2。

为了尽可能减少风阻，应该采用风路转弯较小、风路表面光滑以及流线型的风道结构。

根据式(10-10)和表 10-2 可以计算各段风路的风阻值。如果各段风路是串联的，因为风量相同，于是有

$$\begin{aligned}H&=H_1+H_2+\cdots+H_n=Z_1Q_A^2+Z_2Q_A^2+\cdots+Z_nQ_A^2\\&=(Z_1+Z_2+\cdots+Z_n)Q_A^2=ZQ_A^2\end{aligned} \tag{10-11}$$

其中

$$Z=Z_1+Z_2+\cdots+Z_n \tag{10-12}$$

即各段风路串联，它们的等效风阻等于其各段风阻之和。如果各段风路是并联的，因为两端风压相同，于是有

$$Q_A=Q'_A+Q''_A+\cdots=\sqrt{H}\left(\frac{1}{\sqrt{Z_1}}+\frac{1}{\sqrt{Z_2}}+\cdots+\frac{1}{\sqrt{Z_n}}\right) \tag{10-13}$$

表 10-2 风阻系数

风道结构	示意图	ξ
突缘入口		0.8～1.0
平口入口		0.5
圆弧入口		0.2～0.1
截面突然扩大	S_1 S_2	$\left(1-\frac{S_1}{S_2}\right)^2$
截面突然缩小	S_2 S_1	$0.5\left(1-\frac{S_1}{S_2}\right)$
风路转弯 90°		1.13

（续）

风 道 结 构	示 意 图	ξ
风路转弯 135°		0.5
铁心风道摩擦		$0.1\frac{L}{D}$
光滑风道摩擦		$0.025\frac{L}{D}$

表中：L—风道长度；D—风道直径；S—风道截面。

即

$$H=\frac{Q_A^2}{\left[\frac{1}{\sqrt{Z_1}}+\frac{1}{\sqrt{Z_2}}+\cdots+\frac{1}{\sqrt{Z_n}}\right]^2}=ZQ_A^2 \qquad (10\text{-}14)$$

其中

$$Z=\frac{1}{\left[\frac{1}{\sqrt{Z_1}}+\frac{1}{\sqrt{Z_2}}+\cdots+\frac{1}{\sqrt{Z_n}}\right]^2} \qquad (10\text{-}15)$$

即各段风路并联，它们的等效风阻如式(10–15)所示。

根据电机中风路的具体安排，求出等效风阻后，按

$$H=ZQ_A^2 \qquad (10\text{-}16)$$

和式(10-4)就可以求出所需的风压。在风路中，风压与风量的关系如式(10-16)所示，它是一条抛物线，见图 10-9 的曲线 1。

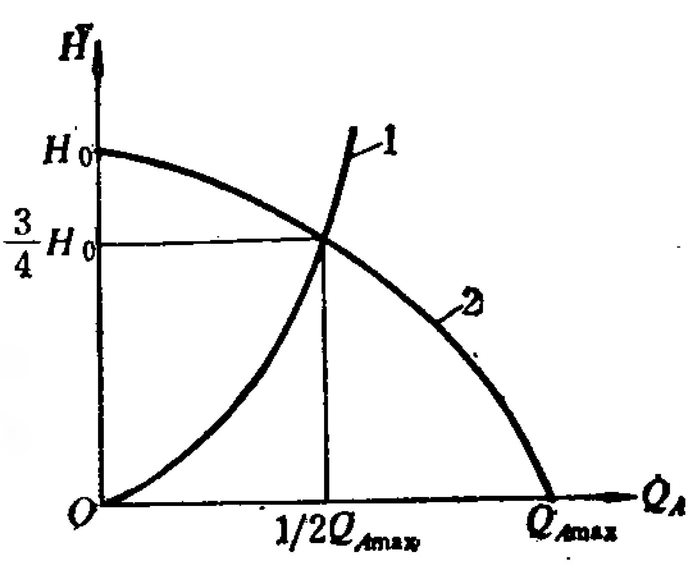


图 10-9　风扇、风阻特性曲线
1—风阻特性　2—风扇特性

还需指出，由于电机的通风道结构复杂，风阻系数较难准确确定，上述风路计算是粗略的。不过，它可以帮助了解各段风阻的大小和风量的分配，有利于风路结构的合理安排和风扇的设计。

10-4　风　扇

中小型自冷式直流电机一般采用离心式风扇，它能产生较高的风压，缺点是效率较低。

离心式风扇的主要尺寸如图 10-10 所示。当风扇旋转时，叶片间的气体受离心力作用，从叶轮的中心部分向外缘方向甩出，产生风压和气流。离心式风扇按所装风叶的形状可分为三类：

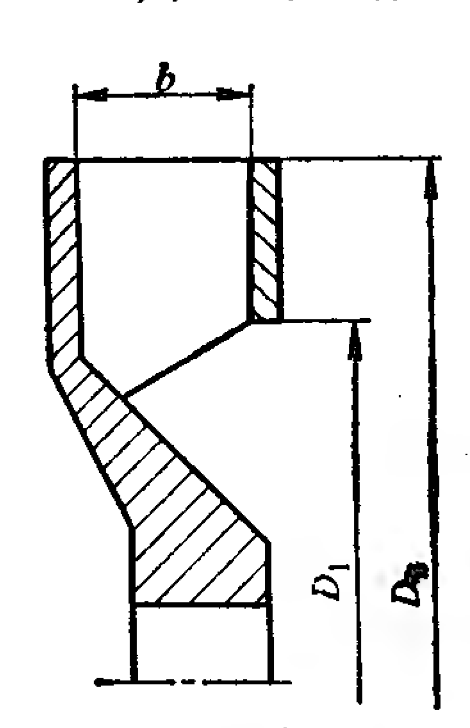


图 10-10　离心式风扇的主要尺寸

(1) 径向式风叶。如图 10-11a)所示，它的特点是可以正反向旋转，在要求可逆转的直流电机中广泛采用，但效率较低。

(2) 前倾式风叶。如图 10-11b)所示，其特点是能产生较高的风压，适宜于低速电机，但风扇只能按图示的方向单向运转。叶片倾角的

常用值为 $\beta_1=25°\sim45°$，$\beta_2=125°\sim135°$。

(3) 后倾式风叶。如图 10-11c)所示，它的特点是噪声低，但风压也低，适宜于高速电机。它也只能按图示方向单向运转。叶片倾角的常用值为 $\beta_1=\beta_2=25°\sim45°$。

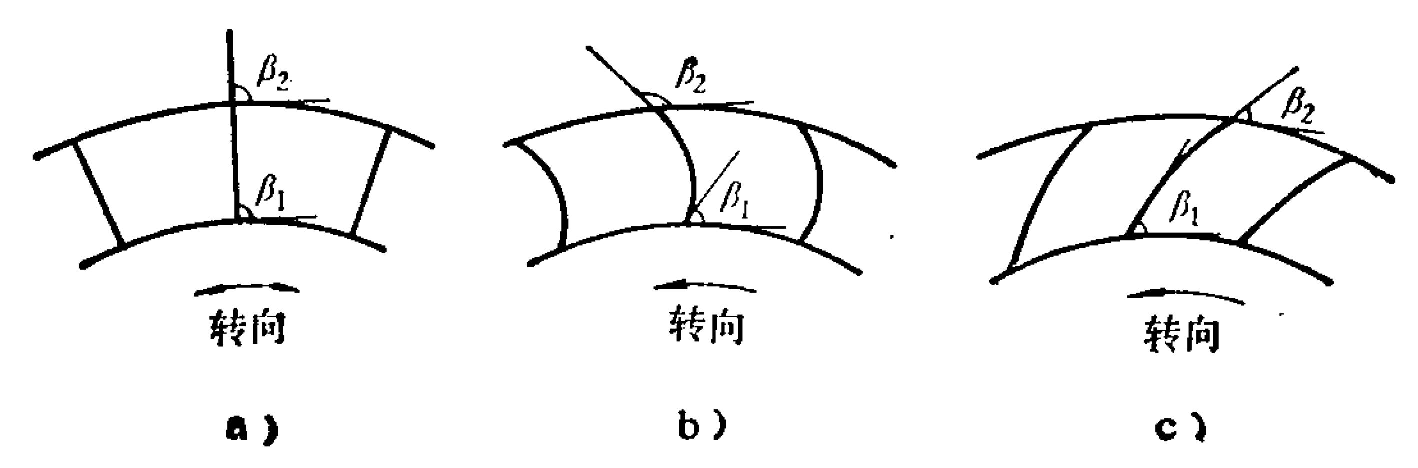


图 10-11 离心式风扇的风叶类型

a) 径向风叶 b) 前倾式风叶 c) 后倾式风叶

离心式风扇的特性，即风扇所产生的静压力 H 和风量 Q_A 的关系，如图 10-9 曲线 2 所示。对径向叶片式风扇，特性曲线 $H=f(Q_A)$ 还可用下式表示

$$\frac{H}{H_0}=1-\left(\frac{Q_A}{Q_{A\,max}}\right)^2 \tag{10-17}$$

式中 H_0——当风扇工作在出风口被封闭时(也即风量等于零时)的静压力(公斤/米²)，相当于风扇“空载”状态时的静压力；

Q_{Amax}——当风路没有风阻时(也即风扇所产生的外压力为零时)流经风扇的最大风量(米³/秒)，相当于风扇“短路”状态时的风量。

H_0 可按下式进行计算

$$H_0=\eta_0\frac{\gamma}{g}(u_2^2-u_1^2) \tag{10-18}$$

式中 η_0——考虑风扇本身压力损失时的气体动效率，对径向叶片可取 0.6；

γ——空气比重;

g——9.81 米/秒^2;

u_1——沿叶片内径的圆周速度(米/秒);

u_2——沿叶片外径的圆周速度(米/秒);

$Q_{A\max}$ 可按下式进行计算

$$Q_{A\max}=0.42\,u_2 S_2 \quad (\text{米}^3/\text{秒}) \tag{10-19}$$

而

$$S_2=0.92\,\pi D_2 b \quad (\text{米})^2 \tag{10-20}$$

式中　S_2——风扇出风口截面;

D_2——叶轮外径(米);

b——叶片的轴向宽度(米);

0.92——考虑由于叶片厚度而使出风口截面减小的系数。

试验表明，离心式风扇的机械效率在最大风量的一半时为最大，所以风扇的最大风量应为额定风量的2倍左右。

当风扇的 Q_A–H 特性及风路的 Q_A–H 特性都已知时，两特性曲线的交点便是风扇在额定状态下的运行点。见图10–9。

离心式风扇的主要尺寸是内径 D_1、外径 D_2、叶片的倾角 β、叶片宽度 b 和叶片数 m。因为具有倾斜叶片的风扇在制造上较径向叶片的风扇复杂，所以一般电机多采用后者。下面简述径向叶片风扇的计算步骤。

风扇外径 D_2 要根据电机的结构而定，一般应采用其可能的最大值。工厂中常采用的值为机座内径的0.8～0.85。

按照选定的风扇外径 D_2 确定圆周速度

$$u_2=\frac{\pi D_2 n}{60} \quad (\text{米}/\text{秒}) \tag{10-21}$$

根据风扇的最大效率来选取最大风量

$$Q_{A\max}=2Q_{AN} \quad (\text{米}^3/\text{秒}) \tag{10-22}$$

从式(10-19)确定风扇出风口的截面

$$S_2=\frac{Q_{A\max}}{0.42u_2} \quad (\text{米}^2) \tag{10-23}$$

然后根据式(10-20)求得风扇叶片宽度

$$b=\frac{S_2}{0.92\pi D_2}\times 100 \quad (\text{厘米}) \tag{10-24}$$

下面确定风扇内径 D_1。在额定风量时，根据式(10-17)及(10-22)可得

$$H_0=\frac{H}{0.75} \quad (\text{公斤}/\text{米}^2) \tag{10-25}$$

其中，H 也就是电机风路中所需的风压，可按风路计算求得。

另一方面，根据式(10-18)

$$H_0=\eta_0\frac{\gamma}{g}(u_2^2-u_1^2)=0.6\times\frac{1.23}{9.81}(u_2^2-u_1^2)$$
$$=0.075(u_2^2-u_1^2) \tag{10-26}$$

按式(10-26)可得:

$$u_1=\sqrt{u_2^2-\frac{H_0}{0.075}} \quad (\text{米}/\text{秒}) \tag{10-27}$$

风扇内径 D_1 等于

$$D_1=\frac{60u_1}{\pi n} \quad (\text{米}) \tag{10-28}$$

在工厂中，按生产经验 D_1 可取电枢外径的1.05～1.15。

风扇叶片数 m 可由下式求得

$$m=\pi\frac{D_2+D_1}{D_2-D_1} \quad (\text{取整数}) \tag{10-29}$$

式(10-29)实际上是要求叶片的径向高度和叶片周向节距相

同，以减少气流通过叶片时的风阻。实践表明，风叶在8片以上时，叶片的风阻已经稳定，因此对小型电机，可取

$$m=8\sim12。$$

此外，在设计风扇时还应注意下列各点：(1)风扇的效率；(2)风扇的噪声；(3)风扇的坚固性，特别对于高速风扇，不论铆接、焊接或铸造，结构都必须牢固；(4)对于风扇装在电机轴上的广调速电机，要考虑低速时风压、风量是否不足和高速时损耗是否过大的问题。

10-5 改善通风散热的措施

直流电机在确定通风系统和风扇以后，为使散热效果良好，还需要在改善风路、加强传热等方面采取措施，使电机温升在限值之内。下面简单介绍工厂在电机设计中为改善通风散热所采取的一些主要措施。

一、风路安排要合理

风路应避免堵塞、漏风、涡流等情况，使风扇充分发挥作用以增加风量。对于防护式电机，从风扇出来的冷却空气是经端盖排出的，端盖的出风口安排合理，出风通畅，就能有效地提高风量。防护式小型电机功率在超出十余千瓦时，电枢损耗逐渐增大，有必要在电枢和换向器内部开辟风路，以加强电枢散热能力，参见图10-3和10-4。显然，与定子风路比较，电枢风路截面较小，风阻较大，因而风量较小。有时，电枢温升较高，而定子温升较低，则可采用在机座端面安装挡风圈的方法，使定子风量减小，相应地增加电枢风量，从而降低电枢温升。

二、电枢绕组端部应尽量架空

电枢绕组端部的导体间一般留有空隙，在近铁心端和外

端较大，而在中间倾斜部分较小，这些部分要尽量架空，使其形成类似离心式风扇叶片的作用，产生径向气流。为此，端部下面的线圈支架和端部上下层间的绝缘要尽量做到不阻碍风路。

三、绕组的绝缘材料应尽量减薄

电机绕组损耗产生的热量经过绝缘材料传导到绕组表面，再由吹拂表面的冷却空气吸收而排出机外。热量经过绝缘材料所造成的温差在整个绕组温升中占一定比值，因此要尽量选用薄的绝缘材料以降低这个温差。Z3 系列电机选用了新型 B 级绝缘材料，其厚度较 Z2 系列所采用的薄得多，例如，电磁扁线原来用双玻璃丝扁线，绝缘厚度为 0.3 毫米，现用聚酯漆包线，绝缘厚度仅约 0.15 毫米；槽绝缘采用聚酯纤维纸聚酯薄膜复合箔后也从 0.6 毫米降到 0.35 毫米。换向极线圈和串励线圈用裸扁线，匝间以小块绝缘垫开，可加强散热效果。这些绝缘材料的改进，都能降低温升。除此之外，改善浸漆工艺，尽可能减少绝缘材料间的空气层，可以有效降低绝缘层的温差。

四、尽量减少机械损耗

高速直流电机的电刷在换向器表面的摩擦损耗，常引起换向器和电机导体的温升增加，因此要适当提高电刷的电流密度，以减小电刷的接触面积，并控制电刷弹簧压力不要过高，从而减少摩擦损耗。滚动轴承的润滑脂不要过多，以免高速电机的轴承发热。这些损耗的减少，对于散热不易的全封闭电机更为重要。

总之，为了降低电机的温升，应根据生产实践，从电磁设计、结构设计和选用绝缘材料等方面采取多种措施。

10-6 从试制电机的试验数据估计电机温升

电机温升是一个很重要的技术指标，成品出厂，温升必须是合格的。由于电机温升不仅决定于电磁参数，还与通风结构、制造工艺、材料选用等有关，所以用一套通风散热的公式来计算温升，不仅复杂，而且不十分准确。因此，工厂在设计电机时，都力求得到同类型试验电机的温升试验数据，用以推算所设计电机的温升。

在系列电机中，一个机座号要安排几个以至十几个规格。一般可选择某一规格作为典型的试验电机，进行不同转速时的温升试验，以得到这些转速时各个绕组的损耗与温升的对应关系。对于直流电机，主要是电枢绕组的损耗与温升的对应关系。试制电机的温升数据将表明，在电机转速和铁心长度不同时，温升和损耗的对应关系就会起变化：对应于同一温升限值，铁心长或转速低的电机，其允许损耗就要降低。有了这一套温升试验数据，对于同机座号其他规格电机的温升就能比较准确地推算出来。系列电机中各机座号的结构常常是类似的，因此与试验电机邻近机座号的电机温升也可作近似估计，而不一定在每个机座号都进行温升试验后才能设计。考虑到电机的使用条件，海拔最高为 1000 米、环境温度最高为 40°C，所以在应用试验电机的温升数据时，需根据试验地点的海拔和室温以及试制电机与成批生产电机的工艺差别，进行必要的调整。

第十一章　结构设计和机械计算

11-1 结构设计

电机设计通常分为两个方面，即电磁设计和结构设计，两者是密切相关的。结构设计的目的是使电机结构能满足性能好、重量轻、体积小、成本低、运行可靠、使用维护方便等要求。

对于一般中、小型直流电机，结构设计可按下列顺序进行。

第一步，根据技术任务书确定电机的总体结构型式，包括电机的防护型式、轴承型式、轴伸型式、通风方式、安装方式等。

第二步，绘制总装配草图。通常从电枢开始，根据电磁计算已确定的电枢尺寸和绕组型式，确定绕组端部的伸出长度，决定换向器、刷杆和电刷的位置，然后根据主磁极和励磁绕组的尺寸，确定机座和端盖。

第三步，根据总装配草图绘出部件的分装配草图。分别画出定子、电枢、换向器等部件，标出必要的尺寸和装配公差，说明技术要求。

第四步，将标准件以外的各个零件的形状和尺寸进一步具体化，确定所有的加工尺寸和公差、加工精度、光洁度和材料规格等，构成零件的加工图。必须注意：一般在绘制分装配图和零件图的过程中，还要随时和总装配草图核对，必要时进行局部的调整。

第五步，计算各零部件的机械性能。所谓机械性能就是指电机运行时零部件在各种力的作用下所产生的应力及其相应的变形。应力的大小不应超过材料的许用应力，变形的大小不应超过影响电机的可靠运行。

在进行结构设计时应考虑以下问题。

(1) 零部件应有足够的强度和刚度。这就要使电机在可能遭遇到的严重工作状况下安全可靠地工作，同时还要尽量减小机械振动和噪声。如电机的轴、升高片、电枢支架等应能承受技术要求所提出的频繁冲击负载和扭振应力；端盖、转轴应有足够的刚度；机座底脚应有足够的稳定度；电枢、换向器、风扇、电枢绕组端部等转动部分的紧固应能承受电机在最高转速下的离心力，并能长期可靠运行。除此以外，风扇、轴承、刷握等要合理设计或选用，以减少机械振动和噪声。

(2) 结构工艺性好。在能满足电机技术要求的条件下，力求结构简单，便于加工装配，制造周期短，成本低。

(3) 通风结构合理。这就要使电机的发热和散热能协调平衡，保证电机在允许负载下，各部位的温升不超过规定的限值。

(4) 维护、检修方便。除了考虑一般电机在维护检修上的共有的问题外，还必须对直流电机特有的换向问题予以注意，在结构上应对观察换向状况、维护换向器和电刷、调整中性位置等创造必要的条件。

(5) 绕组和导电部分的绝缘结构，应根据不同类型电机的需要，有良好的介电性能和耐潮性能。

(6) 零件的标准化、通用化程度高。如尽量采用标准零件、提高零部件的互换性等。

(7) 满足技术条件所提出的关于安装尺寸和外形尺

寸的要求。

在工厂进行结构设计时，可以借鉴和利用以前的生产经验，参考各种类型产品图纸，这样便可大大简化结构设计过程。特别是当电机的功率、转速等条件相类似时，有时根本不经计算就可以很快把结构设计决定下来。因此，本章不再叙述结构设计的细节。在结构设计中，重要零部件机械性能的计算比较关键，本章将逐一进行简单介绍。

11-2 转轴计算

转轴是电机中最重要的零件之一，无论是直流电动机或直流发电机，它都担负着传递转矩的任务。转轴应满足下列基本要求：(1)要有足够的刚度，即轴在转动时的挠度不能太大，以免气隙显著不均匀，甚至电枢与定子相擦，一般控制轴的挠度不超过单边气隙的 6～10%，下限适用于小电机，上限适用于大电机；(2)电机的临界转速应大于电机最高工作转速的 30%，以免发生共振；(3)要有足够的强度，也就是说，在电机运行过程中轴的各个断面的应力不超过允许范围，以免产生残余变形和疲劳破坏。本节主要介绍卧式双支点转轴的挠度、临界转速以及强度计算的方法，并以 Z3-52 直流电机的转轴为例，说明常用的计算程序。

一、轴的挠度计算

对于一般的中、小型直流电机，在计算轴的挠度时，可以把电枢的重量看作是作用在转子铁心中部的集中力，如图 11-1 所示，这样所得的结果偏于安全一些。如果考虑电枢重量是分布地作用在轴上，则可采用图解法求解。由于这两种方法所得的结果相当接近，因此，把重量集中于铁心中部的这个假定是合适的。下面将逐个计算不同作用

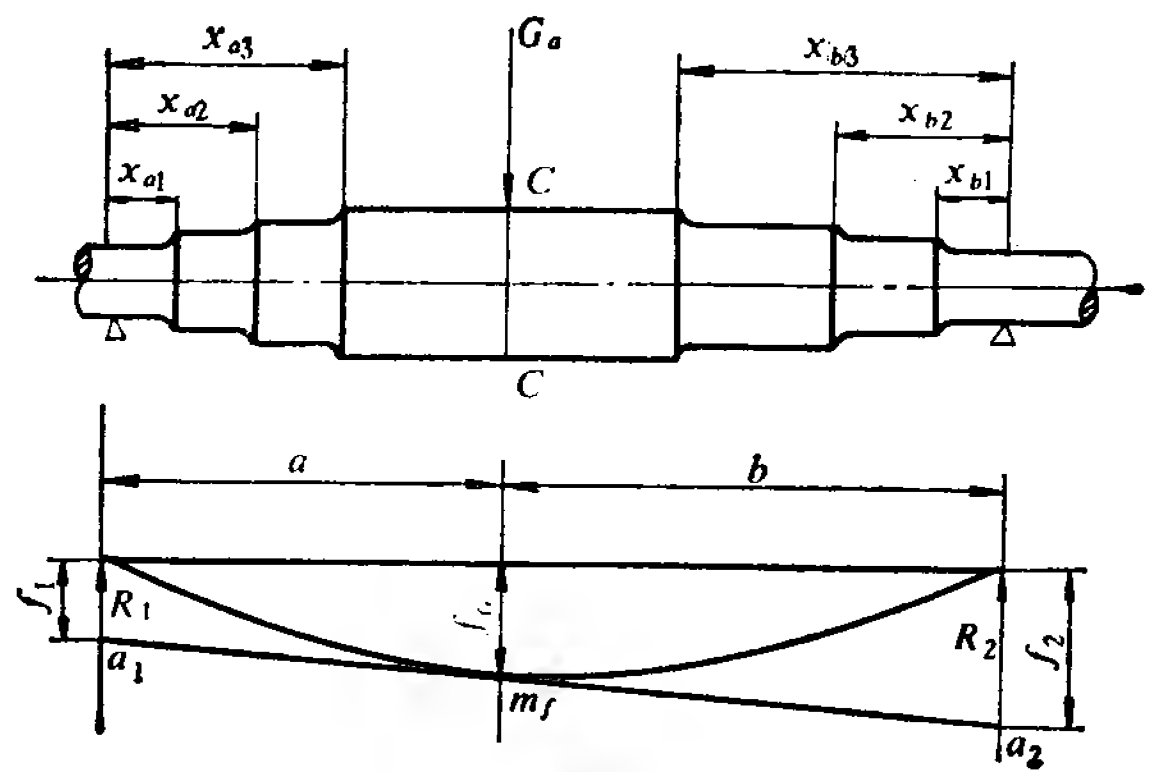


图 11-1 转子自重 G_a 所产生的挠度

力所产生的挠度，先考虑电枢自重所产生的挠度，再考虑轴伸端作用力所产生的挠度，最后计算单边磁拉力所产生的挠度。总挠度是三者分别产生的挠度的叠加。

1. 电枢自重 G_a 所产生的挠度 f_G

在图 11-1 中，G_a 表示电枢自重，f_G 表示自重产生的挠度，a_1a_2 是轴的挠曲弹性线在 m_f 点的切线，f_1、f_2 分别是轴端对 C-C 截面的挠度，常称为条件挠度，分别由支反力 R_1 和 R_2 所决定。根据工程力学中所介绍的阶梯状悬臂梁的挠度计算公式，按图 11-1 得

$$f_1=\frac{R_1}{3E}\left(\frac{x_{a1}^3}{J_{a1}}+\frac{x_{a2}^3-x_{a1}^3}{J_{a2}}+\frac{x_{a3}^3-x_{a2}^3}{J_{a3}}+\frac{a^3-x_{a3}^3}{J_{ac}}\right)\quad(\text{厘米})\qquad(11\text{-}1)$$

$$f_2=\frac{R_2}{3E}\left(\frac{x_{b1}^3}{J_{b1}}+\frac{x_{b2}^3-x_{b1}^3}{J_{b2}}+\frac{x_{b3}^3-x_{b2}^3}{J_{b3}}+\frac{b^3-x_{b3}^3}{J_{bc}}\right)\quad(\text{厘米})\qquad(11\text{-}2)$$

式中 E——转轴所用材料的弹性模量(公斤/厘米^2)；

J_{a1}、J_{a2}、…，J_{b1}、J_{b2}、…——相应轴段的惯性矩（厘米^4）。

支反力 R_1、R_2 可由力的平衡条件得到

$$R_1=\frac{G_a b}{a+b} \quad (\text{公斤}) \tag{11-3}$$

$$R_2=\frac{G_a a}{a+b} \quad (\text{公斤}) \tag{11-4}$$

令 $l=a+b$（厘米）

$$\left.\begin{aligned} X_a&=\frac{x_{a1}^3}{J_{a1}}+\frac{x_{a2}^3-x_{a1}^3}{J_{a2}} \\ &\quad+\frac{x_{a3}^3-x_{a2}^3}{J_{a3}}+\frac{a^3-x_{a3}^3}{J_{ac}} \quad (1/\text{厘米}) \\ X_b&=\frac{x_{b1}^3}{J_{b1}}+\frac{x_{b2}^3-x_{b1}^3}{J_{b2}} \\ &\quad+\frac{x_{b3}^3-x_{b2}^3}{J_{b3}}+\frac{b^3-x_{b3}^3}{J_{bc}} \quad (1/\text{厘米}) \end{aligned}\right\} \tag{11-5}$$

那末，将式(11-3)、(11-4)和(11-5)代入式(11-1)和(11-2)得

$$f_1=\frac{G_a b}{3El}X_a \quad (\text{厘米}) \tag{11-6}$$

$$f_2=\frac{G_a a}{3El}X_b \quad (\text{厘米}) \tag{11-7}$$

根据图 11-1 所示的几何关系可得到在轴中部截面 C–C 的挠度 f_G 为

$$f_G=f_1+(f_2-f_1)\frac{a}{a+b} \quad (\text{厘米})$$

即

$$f_G=\frac{f_1 b+f_2 a}{a+b} \quad (\text{厘米}) \tag{11-8}$$

将式(11-5)、(11-6)和(11-7)代入式(11-8)得

$$f_G=\frac{G_a}{3El^2}(X_a b^2+X_b a^2) \quad (\text{厘米}) \tag{11-9}$$

2. 轴伸端作用力 P 所产生的挠度 f_p

根据工程力学，挠度 f_p 可以用计算 f_G 相似的方法求得

$$f_p=\frac{Pd}{3El^2}\left[\left(\frac{3}{2}lX_0-X_a\right)b+X_b a\right] \quad (\text{厘米}) \quad (11\text{-}10)$$

式中 P——轴伸端上的作用力(公斤)，例如皮带总拉力或齿轮压力；

d——作用力 P 到附近支点的距离(厘米)。

而

$$X_0=\frac{x_{a1}^2}{J_{a1}}+\frac{x_{a2}^2-x_{a1}^2}{J_{a2}}+\frac{x_{a3}^2-x_{a2}^2}{J_{a3}}+\frac{a^2-x_{a3}}{J_{ac}} \quad (1/\text{厘米}^2) \quad (11\text{-}11)$$

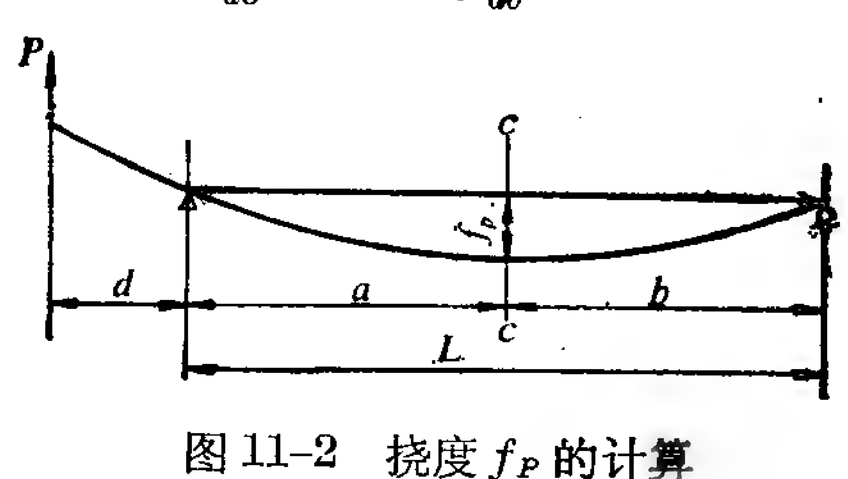


图 11-2 挠度 f_P 的计算

3. 单边磁拉力所引起的挠度 f_δ

由于加工和安装的偏差，再加上轴承的摩损以及挠度 f_G、f_P 等，都会导致电机气隙不均匀，产生电枢对定子的起始偏心。对于四极及其以上的电机，在气隙小的地方，磁通密度就较大，而气隙大的地方，磁通密度就较小。显然，磁通密度的不相等导致径向磁拉力不能平衡，从而有一个单边磁拉力使电机轴产生附加弯曲，这个附加弯曲使偏心益甚，单边磁拉力越大，因而进一步增大轴的挠度。这样反复作用，最后达到稳定状态。

如果用 e_0 代表起始偏心(对于小型电机，通常可取 $e_0=$

0.1δ)，根据工厂实践经验，对于 $2p\geqslant4$ 的电机，单边磁拉力的初始值 θ_0 可按下式计算

$$\theta_0=3D_a l_a\frac{e_0}{\delta}\quad(\text{公斤})\tag{11-12}$$

若起始单边磁拉力 θ_0 作用于电枢铁心的中部，则可以用计算挠度 f_G 相同的方法来得到起始偏心所引起的挠度 f_0，因此有以下关系

$$f_0=\frac{f_G}{G_a}\theta_0\quad(\text{厘米})\tag{11-13}$$

挠度 f_0 将进一步引起单边磁拉力的增加，其数值为

$$\theta_0'=3D_a l_a\frac{f_0}{\delta}$$

这个增加的单边磁拉力 θ_0' 所引起的挠度是

$$f'=\frac{f_G}{G_a}3D_a l_a\frac{f_0}{\delta}=\frac{f_G}{G_a}\frac{\theta_0}{e_0}f_0$$

$$=f_0\left(\frac{f_0}{e_0}\right)\quad(\text{厘米})\tag{11-14}$$

f' 又将引起磁拉力的增加

$$\theta_0''=3D_a l_a\frac{f'}{\delta}\quad(\text{公斤})$$

这个增加的磁拉力 θ_0'' 又引起挠度的增加，其数值为

$$f''=f_0\left(\frac{f_0}{e_0}\right)^2\quad(\text{厘米})$$

依次类推，若

$$\frac{f_0}{e_0}=m<1,$$

则可得到由单边磁拉力所产生的总挠度

$$f_\delta=f_0[1+m+m^2+\cdots]$$

$$=f_0\left(\frac{1}{1-m}\right)\quad(\text{厘米})\tag{11-15}$$

把 f_G、f_P 和 f_δ 三者相加，便得到总挠度

$$f=f_G+f_P+f_\delta \quad (\text{厘米}) \tag{11-16}$$

二、轴的临界转速

当弹性轴的自振周期与外来作用力的周期一致时，振动的振幅可能达到极大的数值，这种现象称之为共振。当转轴在某一转速下旋转时，由于受到离心力的作用也会出现共振现象，产生这种现象时的转速称为临界转速。当达到临界转速时，转速的挠度趋于无穷大。

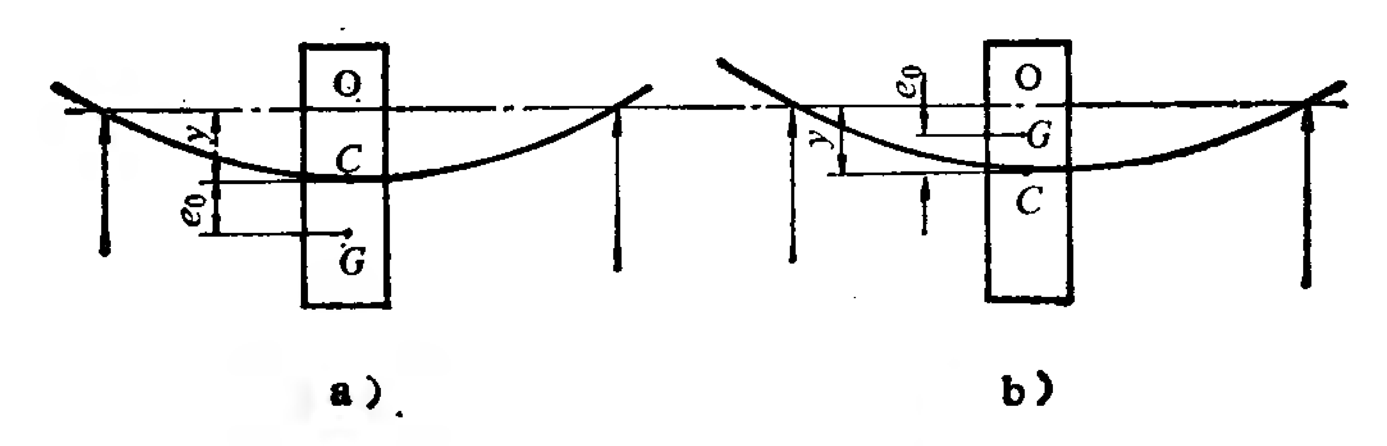


图 11-3 转轴临界转速的计算

a) 旋转速度低于临界转速的情况

b) 旋转速度高于临界转速的情况

如图 11-3 所示，O 点为旋转中心，e_0 为转子重心 G 与轴心 C 的偏心值，它是由制造上或材料本身的缺陷所造成的。当转子旋转时，产生离心挠度 y。如果忽略系统的摩擦等，则离心力和挠度为 y 时的磁拉力应该由轴的弹性力所平衡，从而写出力的平衡方程式

$$\frac{G_a}{g}(y+e_0)\omega^2=\frac{G_a}{f_G}y-\frac{\theta_0}{e_0}y \tag{11-17}$$

式中 G_a/g——转子的质量（公斤·秒²/厘米）；

ω——转子的旋转角速度（1/秒）。

从式(11-17)中解出 y

$$y=\frac{\frac{G_a}{g}e_0\omega^2}{\frac{G_a}{f_G}-\frac{G_a}{g}\omega^2-\frac{\theta_0}{e_0}}\quad(厘米)\qquad(11\text{-}18)$$

当式(11-18)的分母趋于零时，其挠度 y 将趋于无穷大。此时的角速度 ω_K 称为临界角速度，其对应的转速称为临界转速 n_K。n_K 可由下面两式求解

$$\frac{G_a}{f_G}-\frac{G_a}{g}\omega_K^2-\frac{\theta_0}{e_0}=0\qquad(11\text{-}19)$$

$$n_K=\frac{\omega_K\times60}{2\pi}\quad(转/分)\qquad(11\text{-}20)$$

注意到式(11-13)和 $\frac{f_0}{e_0}=m$，从而得到

$$n_K=\frac{60\sqrt{g}}{2\pi}\sqrt{\frac{1-m}{f_G}}\approx300\sqrt{\frac{1-m}{f_G}}\quad(转/分)\qquad(11\text{-}21)$$

用上式计算所得的临界转速 n_K 值应比电机运行或试验时的最高速度高出30%，即 $n_K\geqslant1.3n_{max}$。

如果旋转的速度低于临界转速，即 $n<n_K$，式(11-18)中的分母为正，y 和 e_0 同方向，如图11-3a)所示；如果旋转的速度高于临界转速，即 $n>n_K$，则式(11-18)中分母为负，y 与 e_0 反方向，如图11-3b)所示。

三、轴的强度计算

在纯粹的扭转转矩作用下，轴的剪切应力为

$$\tau=\frac{KT_N}{\frac{\pi d^3}{16}}\approx\frac{KT_N}{0.2d^3}\quad(公斤/厘米^2)\qquad(11\text{-}22)$$

式中 K——过载系数，对于普通直流电机 $K=1.8$，对于轧钢直流电机 $K=3$；

$$T_N=97500\ \frac{P_N}{n_N}$$——额定转矩(公斤·厘米)；

d——从键槽的底量起的轴的计算直径(厘米)，如图 11-4 所示。

在纯弯曲的情况下，轴的弯曲应力为

$$\sigma=\frac{M}{\frac{\pi d^3}{32}}\approx\frac{M}{0.1d^3}\quad(公斤/厘米^2)\qquad(11\text{-}23)$$

式中　M——弯曲力矩(公斤·厘米)。

轴的有些断面往往同时受到扭转转矩 KT_N 及弯曲力矩 M 的作用。根据工程力学，其等效弯曲应力为

$$\sigma_d=\frac{1}{0.1d^3}\sqrt{M^2+(\alpha KT_N)^2}\quad(公斤/厘米^2)\ (11\text{-}24)$$

式中　α——许用弯曲应力与两倍许用剪切应力之比，对可逆转电机取 0.8，对不可逆转电机取 0.6。

σ_d 应小于材料的许用弯曲应力。

通常，在用联轴器联接的电机中，应该取轴伸 a-a 处作为危险断面，见图 11-5，此处只有扭转转矩 T_N，验算时可用式(11-22)；在用皮带轮传动时，危险断面在图 11-5 中的 b-b 处，此处既受扭转转矩 T_N，又受弯曲力矩 M，验算时可用式

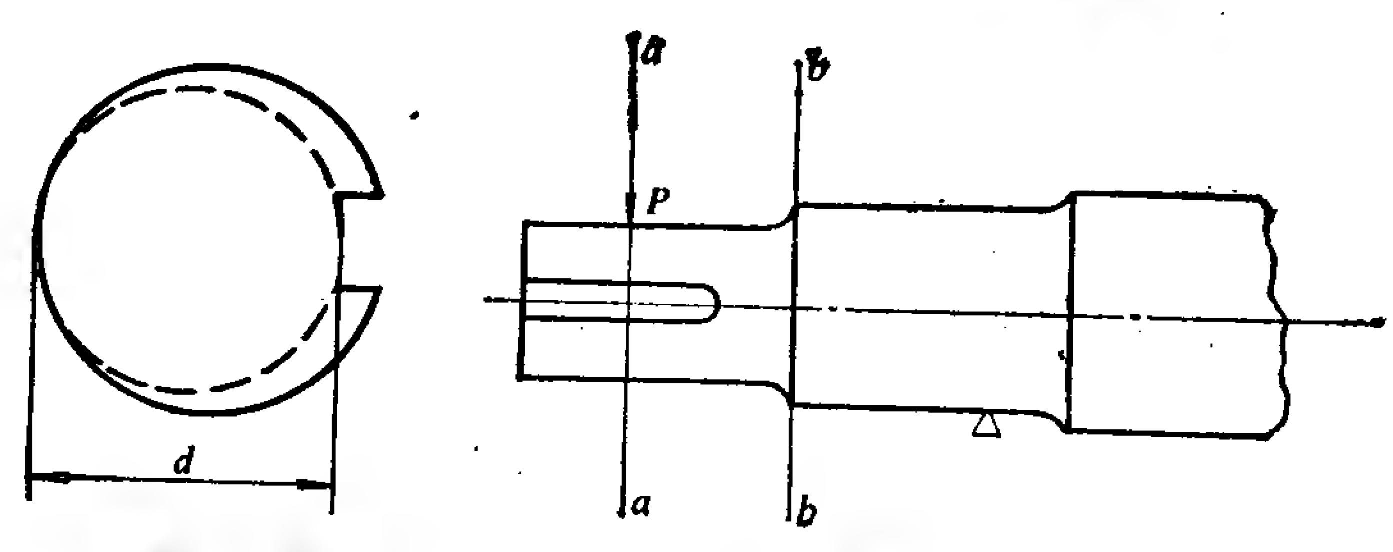


图 11-4　轴的计算直径　　　　图 11-5　轴的危险断面

(11–24)，如果在加工时此处倒角不好，就容易发生断裂。

例 11–1 一台 Z3–52 直流电动机，$P_N=7.5$ 千瓦，$n_N=1500$ 转/分，最大工作转速 $n_{max}=3000$ 转/分，$D_a=13.8$ 厘米，$l_a=13.5$ 厘米，$\delta_{min}=0.08$ 厘米，电枢总重 $G_a=17$ 公斤，皮带拉力 $P=125$ 公斤，轴的尺寸如图 11–6 所示。

1．挠度计算

(1) 电枢重量 G_a 在铁心中部产生的挠度 f_G

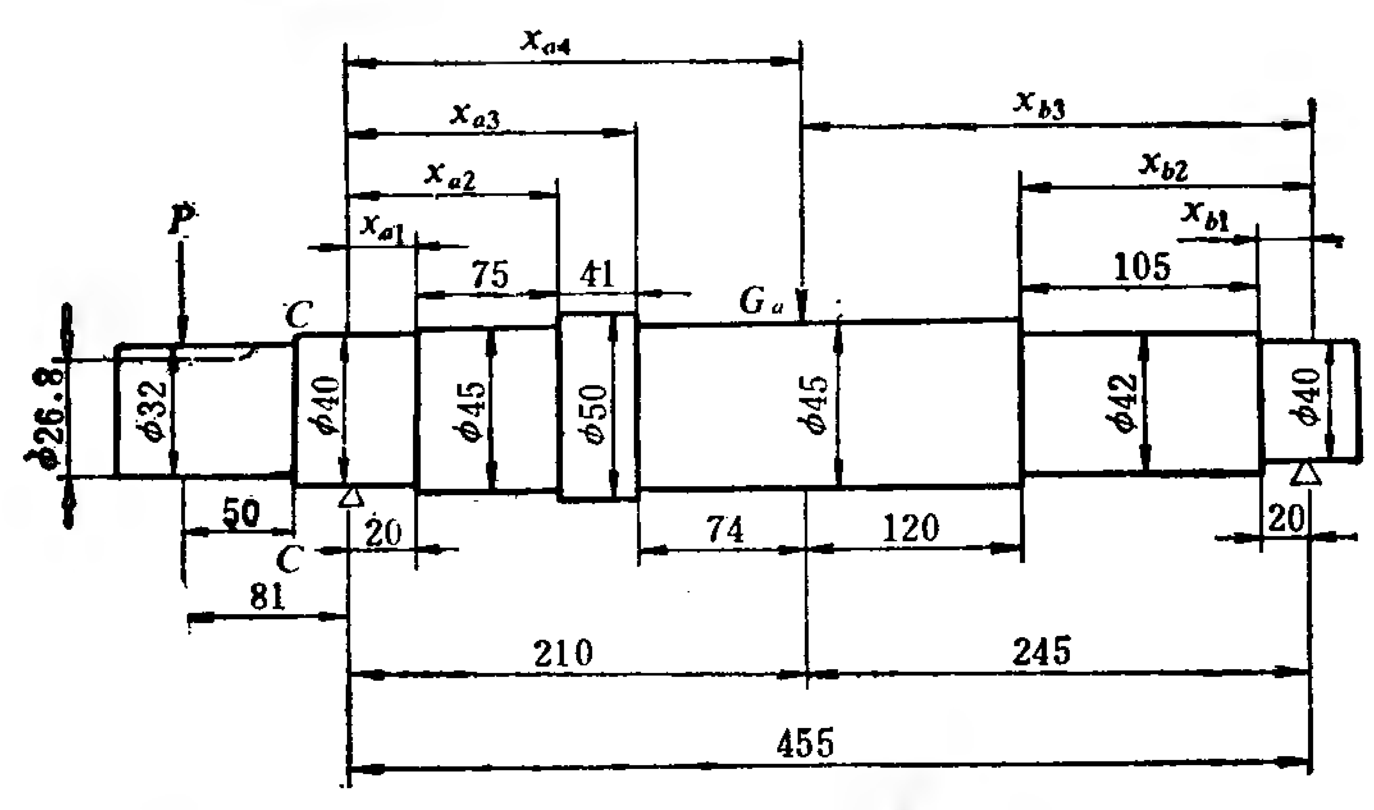


图 11–6 Z3–52 直流电动机轴的尺寸

转轴各段的惯性矩

$$J_{d-4.0}=\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi\times 4^4}{64}=12.566 \quad (厘米^4);$$

$$J_{d-4.2}=\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi\times 4.2^4}{64}=15.275 \quad (厘米^4);$$

$$J_{d-4.5}=\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi\times 4.5^4}{64}=20.129 \quad (厘米^4);$$

$$J_{d-5.0}=\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi\times 5.0^4}{64}=30.680 \quad (厘米^4)。$$

前轴段系数 X_a 为

$$X_a=\frac{2^3}{12.566}+\frac{9.5^3-2^3}{K_2\times20.129}+\frac{13.6^3-9.5^3}{30.680}+\frac{21^3-13.6^3}{K_1\times20.129}=401.5\quad(1/厘米);$$

后轴段系数 X_b 为

$$X_b=\frac{2^3}{12.566}+\frac{12.5^3-2^3}{K_3\times12.275}+\frac{24.5^3-12.5^3}{K_1\times20.129}=699.3\quad(1/厘米)。$$

式中 K_1——电枢铁心段惯性矩增强系数，在 D/d 公差配合时，取 $K_1=1.1$；

K_2——风扇段惯性矩增强系数，在静配合时，取 $K_2=1.2$，在动配合时取 $K_2=1.0$；

K_3——换向器段惯性矩增强系数，对钢结构长换向器，取 $K_3=1.3$，对塑料换向器，取 $K_3=1.1$。

电枢重量产生的挠度 f_G 按式(11-9)计算得

$$f_G=\frac{G_a}{3El^2}(X_ab^2+X_ba^2)$$

$$=\frac{17}{3\times2.1\times10^6\times45.5^2}(401.5\times24.5^2+699.3\times21^2)$$

$$=7.161\times10^{-4}\quad(厘米)$$

其中因转轴所用的材料为45号钢，取弹性模量 $E=2.1\times10^6$ 公斤/厘米^2。

(2) 皮带拉力在铁心中部产生的挠度 f_P

皮带拉力 P 为125公斤，皮带拉力的作用点离支点的距离 d 为8.1厘米，由式(11-11)可以算得

$$X_0=\frac{2^2}{12.566}+\frac{9.5^2-2^2}{20.129}+\frac{13.6^2-9.5^2}{30.680}+\frac{21^2-13.6^2}{1.1\times20.129}=19.254\quad(1/厘米^2)$$

f_P 按式(11-10)计算得

$$f_P=\frac{Pd}{3El^2}\left[\left(\frac{3}{2}lX_0-X_a\right)b+X_b a\right]$$

$$=\frac{125\times 8.1}{3\times 2.1\times 10^6\times 45.5^2}$$

$$\times\left[\left(\frac{3}{2}\times 45.5\times 19.254-401.5\right)\times 24.5+699.3\times 21\right]$$

$$=2.875\times 10^{-3}\quad(\text{厘米})$$

(3) 单边磁拉力在铁心中部产生的挠度f_δ

起始偏心

$$e_0=0.1\delta_{\min}=0.1\times 0.08=0.008\quad(\text{厘米})$$

单边磁拉力初始值

$$Q_0=3D_a l_a\frac{e_0}{\delta_{\min}}=3\times 13.8\times 13.5\times\frac{0.008}{0.08}=56\quad(\text{公斤})$$

磁拉力初挠度

$$f_0=f_G\frac{Q_0}{G_a}=7.16\times 10^{-4}\times\frac{56}{17}=23.6\times 10^{-4}\quad(\text{厘米})$$

比值 $m=\dfrac{f_0}{e_0}=\dfrac{23.6\times 10^{-4}}{8\times 10^{-3}}=0.295$

单边磁拉力稳定挠度

$$f_\delta=\frac{f_0}{1-m}=\frac{23.6\times 10^{-4}}{1-0.295}=3.348\times 10^{-3}\quad(\text{厘米})$$

(4) 总挠度f

按式(11-17)计算得

$$f=f_G+f_P+f_\delta$$

$$=7.16\times 10^{-4}+2.875\times 10^{-3}+3.348\times 10^{-3}$$

$$=6.939\times 10^{-3}\quad(\text{厘米})$$

$$\frac{f}{\delta_{\min}}=\frac{6.939\times 10^{-3}}{8\times 10^{-2}}=8.67\%<10\%$$

2．临界转速 n_K

按公式(11-21)可以算得

$$n_K = 300 \times \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} = 300 \times \sqrt{\frac{1-0.295}{7.16 \times 10^{-4}}} = 9414 \quad (转/分)$$

对最大工作转速 n_{max} 的比值为

$$\frac{n_K}{n_{max}} = \frac{9414}{3000} = 3.14 > 1.3$$

3．强度计算

该轴的最危险断面为 c-c，见图 11-6。现核算该处的强度。

额定扭转力矩

$$T_N = 97500\frac{P_N}{n_N} = 97500 \times \frac{7.5}{1500} = 487.5 \quad (公斤·厘米)$$

轴的最危险断面 c-c 在过载系数 $K=1.8$ 时的弯曲力矩 M 由图 11-6 可求得

$$M = KPl_0 = 1.8 \times 125 \times 5 = 1125 \quad (公斤·厘米)$$

过载时扭转转矩和弯曲力矩合成的等效弯曲力矩

$$M_e = \sqrt{M^2 + (\alpha K T_N)^2} = \sqrt{1125^2 + (0.8 \times 1.8 \times 487.5)^2}$$
$$= 1326 \quad (公斤·厘米)$$

上式中取 $\alpha=0.8$，为考虑可逆转的情况。

由图 11-6 知，计算轴径 $d=2.68$ 厘米，则轴伸的等效弯曲应力为

$$\sigma_d = \frac{M_e}{0.1d^3} = \frac{1326}{0.1 \times 2.68^3} = 689 \quad (公斤/厘米^2)$$

而：45 号轴钢，其许用应力为 $[\sigma]=890$(公斤/厘米^2)，

35 号轴钢，其许用应力为 $[\sigma]=740$ (公斤/厘米^2)。

因此，这两种轴钢材料在本例中均可应用。

11-3 扎带计算

小型直流电机电枢绕组过去是用钢丝绑扎。钢丝绑扎的工艺复杂，劳动强度大，近年来已用环氧酚醛无纬玻璃丝带代替。这种玻璃丝带的极限强度为5000公斤/厘米²，考虑到扎带层间受力均匀，故通常取扎带的许用应力为$[\sigma]=1500$公斤/厘米²。扎带的厚度h为0.017厘米，扎带的宽度b有1.5厘米和2.5厘米两种规格，前者用于较小的电机(如Z3系列的1号和2号机座的电机)，后者用于较大的电机。扎带的预紧力对于1.5厘米宽的可选用20公斤左右，对于2.5厘米宽的可选用35公斤左右。

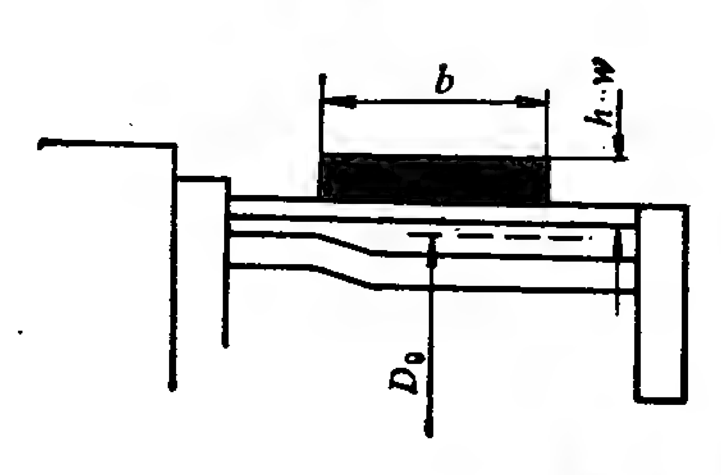


图11-7 绕组端部扎带计算用图

绕组端部扎带计算的任务是确定其层数，现在说明如下。

设G为扎带所支持的绕组重量(公斤)，D_0为绕组的平均直径(厘米)，如图11-7所示。则当其最高转速为n_{max}(转/分)时，它所产生的离心力是

$$F=\frac{G}{g}\left(\frac{2\pi n_{max}}{60}\right)^2\frac{D_0}{2}=5.6GD_0\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \quad (公斤) \tag{11-25}$$

扎带断面上的拉应力为

$$\sigma=\frac{F}{2\pi wS_w}=\frac{GD_0}{1.12wS_w}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \quad (公斤/厘米^2) \tag{11-26}$$

式中 w——扎带层数；

S_w——扎带每层截面积，等于bh(厘米²)

若已知匝带的许用应力$[\sigma]$及其截面积S_w，便可利用式(11-26)求取匝带层数

$$w \geqslant \frac{GD_0\left[\frac{n_{max}}{1000}\right]^2}{1.12S_w[\sigma]} \tag{11-27}$$

例 11-2 一台 Z3-52 直流电动机，它的最高转速n_{max}为4320 转/分，电枢绕组端部重量G为 0.8 公斤，绕组端部的平均直径D_0为 11.5 厘米，扎带厚度为$\delta=0.017$厘米，扎带宽度$b=2.5$厘米，试求扎带层数w。

解 每层扎带的截面积$S_w=h\cdot b=0.017\times 2.5=0.0425$厘米^2。

根据式(11-27)，扎带层数为

$$w=\frac{GD_0\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2}{1.12S_w[\sigma]}=\frac{0.8\times 11.5\times\left(\frac{4320}{1000}\right)^2}{1.12\times 0.0425\times 1500}=2.40$$

取w为 3 层。由离心力所产生的拉应力

$$\sigma=\frac{GD_0\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2}{1.12S_w w}=\frac{0.8\times 11.5\times\left(\frac{4320}{1000}\right)^2}{1.12\times 0.0425\times 3}$$

$$=1202 \quad (\text{公斤/厘米}^2)$$

11-4 主磁极固紧螺钉的计算

主极螺钉通常受到下列三种力：(1)负载转矩作用于主磁极表面的切向力Q；(2)主磁极铁芯及其绕组的重量G；(3)主磁极和电枢以及主磁极和换向极之间的磁拉力。其中第(2)、(3)两项在一般中小型直流电机中可以忽略不计，所以只计算第(1)项的作用即可。

如图 11-8 所示，当过载时每极上所作用的切向力为

$$Q=\frac{KT_N}{2p}\frac{2}{D_a}=\frac{KT_N}{pD_a}\quad(公斤)\qquad(11\text{-}28)$$

设螺钉的拉紧力为 Q_1，要求 Q_1 在主磁极和机座轭的接触面之间建立足够的摩擦力 μQ_1，以平衡极面上的切向作用力 Q，即

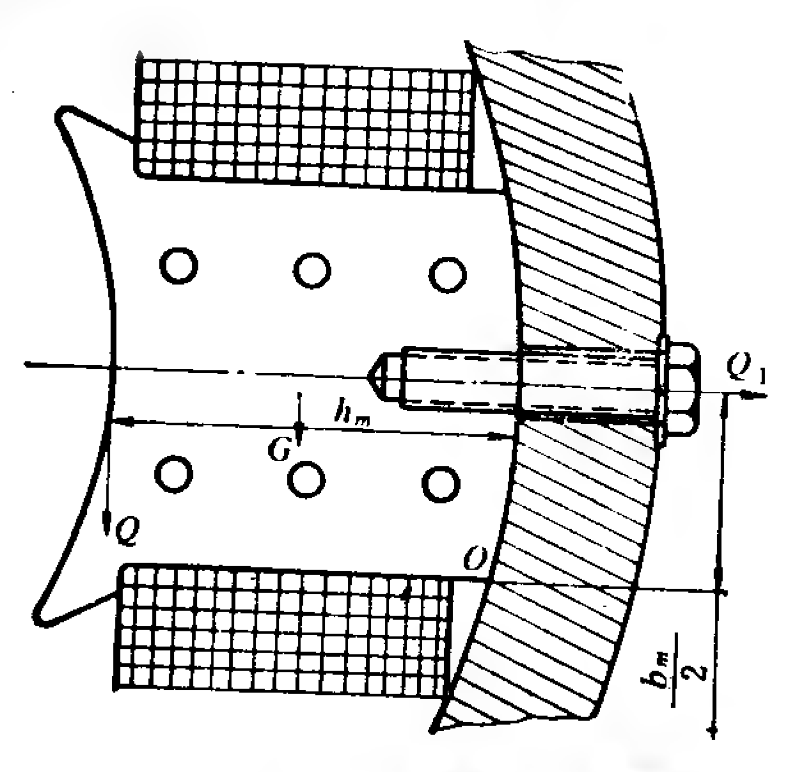


图 11-8　主磁极螺钉的计算

$$Q=\mu Q_1\quad(公斤)\qquad(11\text{-}29)$$

式中　μ——摩擦系数，一般可取 $\mu=0.2$。

考虑到载荷的动态性质，取

$$Q_1=2\frac{Q}{\mu}=10Q\quad(公斤)\qquad(11\text{-}30)$$

选择适当的螺钉直径，使其最小截面的拉应力不超过所用材料的许用应力。若 m 为每极螺钉的只数，A_0 为螺纹危险断面的面积(即最小截面，见表 11-1)，螺钉拉伸许用应力 $[\sigma_1]$ 为 600 公斤/厘米²，则

$$\sigma_1=\frac{Q_1}{mA_0}<[\sigma_1]\qquad(11\text{-}31)$$

除核算上述拉应力以外，为保证主磁极和机座轭之间确实存在着可靠的接触面，必须满足下列关系(如图 11-8 所示，以 O 为支点)：

$$Q_1\frac{b_m}{2}\geqslant Qh_m$$

即

$$Q_1\geqslant\frac{2h_m}{b_m}Q\quad(公斤)$$

在通常的电机中，$2h_m/b_m<10$，因此，凡能满足 $Q_1=10Q$ 条件的，必定满足 $Q_1\geqslant\frac{2h_m}{b_m}Q$。

例 11-3 一台 Z3-52 直流电动机，$P_N=7.5$ 千瓦，$n_N=1500$ 转/分，$D_a=13.8$ 厘米，$2p=4$，每极两只主磁极螺钉，其直径 $d=8$ 毫米，试验算其强度。

解 在过载时每极面上的作用力

$$Q=\frac{KT_N}{PD_a}=\frac{1.8\times488}{2\times13.8}=31.8 \quad (\text{公斤})$$

其中过载系数 K 取 1.8，而

$$T_N=97500\frac{P_N}{n_N}=97500\times\frac{7.5}{1500}=488 \quad (\text{公斤·厘米})$$

螺钉的拉力

$$Q_1=10Q=10\times31.8=318 \quad (\text{公斤})$$

对于直径 $d=8$ 毫米的螺钉，其最小截面积 A_0 可从表 11-1 查得 $A_0=0.308$ 厘米²。因此

$$\sigma_1=\frac{Q_1}{mA_0}=\frac{318}{2\times0.308}$$

$$\approx516(\text{公斤/厘米}^2)<[\sigma_1]=600 \quad (\text{公斤/厘米}^2)$$

表 11-1 公制螺纹有关数据

螺钉规格	螺纹内径（毫米）	断面面积 A_0（厘米²）	螺距（毫米）	螺钉规格	螺纹内径（毫米）	断面面积 A_0（厘米²）	螺距（毫米）
M6	4.701	0.167	1.0	M20	16.753	2.145	2.5
M8	6.377	0.308	1.25	M24	19.103	3.089	3.0
M10	8.051	0.492	1.50	M30	25.454	4.963	3.5
M12	9.727	0.718	1.75	M36	30.804	7.279	4.0
M16	13.402	1.373	2.0	M42	36.155	10.04	4.5
M18	14.753	1.657	2.5	M48	41.505	13.23	5.0

11-5 换向器的计算

换向器是直流电机中比较复杂而且重要的部件。中小型直流电机换向器的典型结构如图 11-9 和 11-10 所示。图 11-9 为塑料换向器，它的优点是零件较少，生产效率高，结构整体性好，耐潮、耐震性能较好，重量较轻，尺寸较小，成本较低。但是目前由于材料和加工工艺的限制，这种结构尚局限

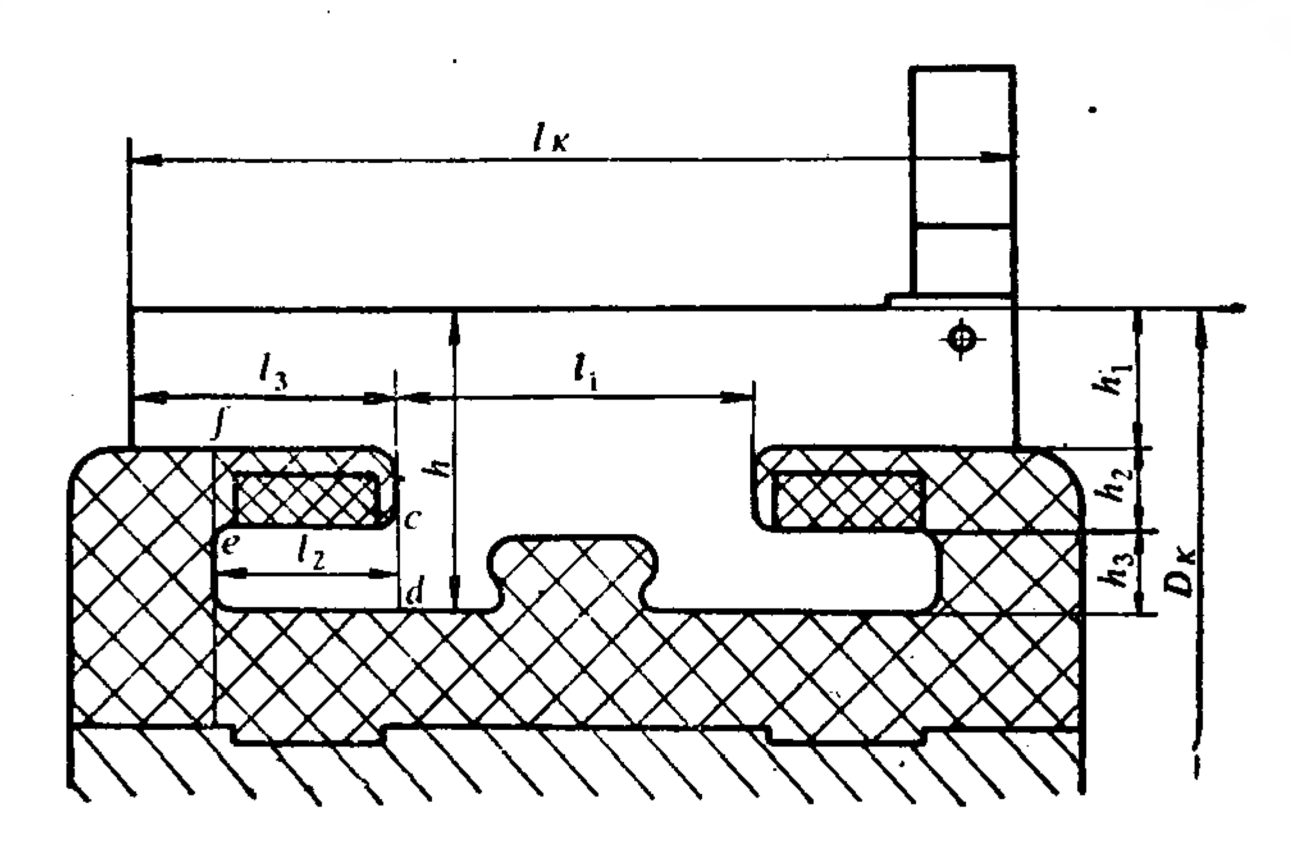


图 11-9 塑料换向器

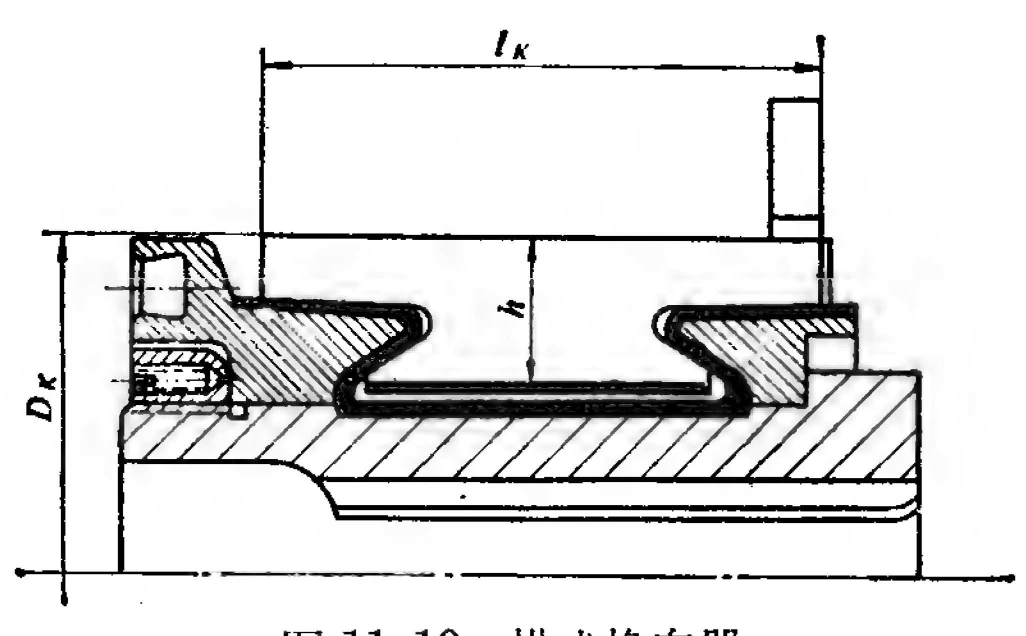


图 11-10 拱式换向器

用于换向器直径 $D_K<15$ 厘米的电机。图 11-10 为拱式(用环形螺母固紧)换向器。这种结构通常用于换向器直径 $D_K=15\sim25$ 厘米的电机。

为使换向器能正常工作，换向器表面应严格保持圆筒形状,并且不能有云母片凸出及松动等情况发生。因此,必须计算换向器的各个组成部分，使在任何工作情况下能保证换向片间的压力有一定的数值，并且使其应力不超过允许的限度。拱式换向器和塑料换向器主要零件的机械计算方法如下。

一、换向片上的作用力

作用于换向片上的力通常可分为下列几种:(1)为防止云母片甩出和换向片表面变形而必须在片间建立的拱压力 P_K; (2)换向片运转时产生的离心力 P_ω; (3)拉紧螺母通过V形压圈作用于换向片或鸽尾上的力或塑料作用于换向片鸽尾上的力 P_n。

现在来研究各力的大小及其相互间的关系。

若 P_K 为片间拱压力，S_K 为换向片的侧面积，则其片间单位面积的压力为

$$p_K=\frac{P_K}{S_K}\quad (公斤/厘米^2) \tag{11-32}$$

通常,根据生产实践经验,对于中小型直流电机的 p_K 值可按下列经验公式算得

$$p_K=60+5\left(\frac{n_{max}}{1000}\,\frac{D_K}{10}\right)^{\frac{3}{2}}\quad (公斤/厘米^2) \tag{11-33}$$

p_K 如果太小,则运行时换向器表面将发现不许可的变形。

由图 11-11 可见，换向片两侧的压力 P_K 将会产生一个径向推力 P_P, P_P 可通过几何关系求得

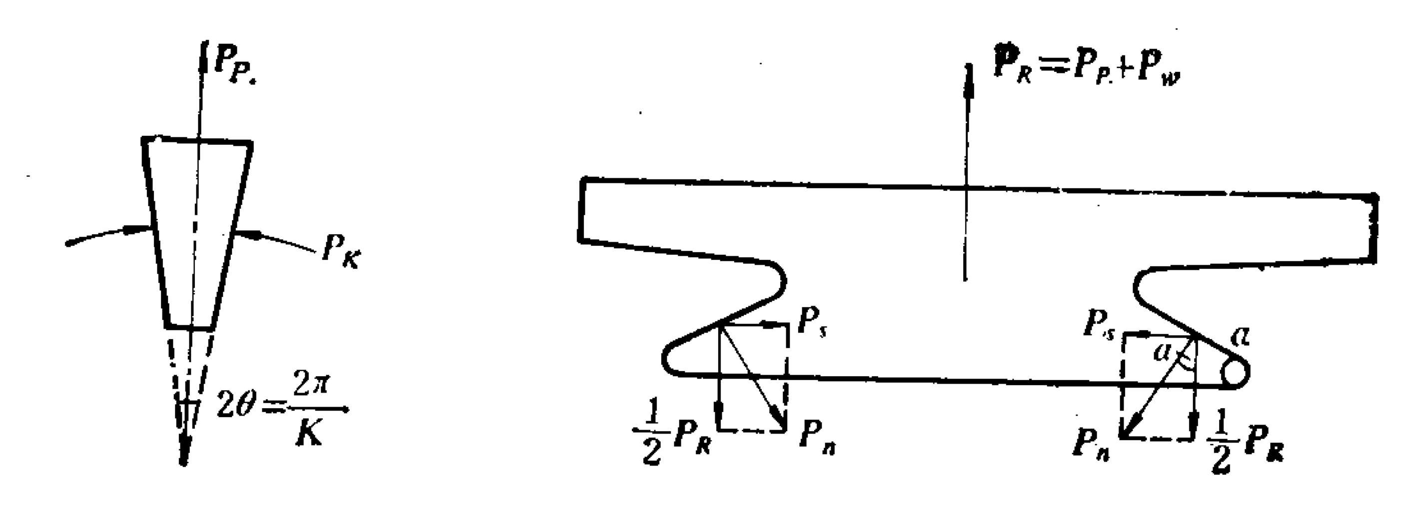


图 11-11 作用于换向片上的力

$$P_P=2P_K\sin\frac{2\theta}{2}\approx 2P_K\theta=2P_K\frac{\pi}{K}$$

$$=\frac{2\pi p_K S_K}{K}\quad(\text{公斤})\qquad(11\text{-}34)$$

式中 2θ——相邻换向片中心线间的夹角。

同时，作用于一个换向片上的离心力 P_ω 也是一个径向力 P_ω 可按下式计算

$$P_\omega=\frac{G}{g}\omega^2R=\frac{\pi(D_K-h)S_K\times 7.85\times 10^{-3}}{gK}$$

$$\times\left(\frac{2\pi n_{\max}}{60}\right)^2\times\frac{(D_K-h)}{2}$$

$$=0.138\frac{(D_K-h)^2}{K}S_K\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2(\text{公斤})\qquad(11\text{-}35)$$

式中 h——换向片高度(厘米)，见图 11-10;

$n_{\max}$——最高转速(转/分);

7.85×10^{-3}——换向器(包括云母片)的平均比重(公斤/厘米^3)。

P_ω 与 P_P 两者的合成是作用于换向片的径向合力

$$P_R=P_\omega+P_P\quad(\text{公斤})\qquad(11\text{-}36)$$

对于拱式换向器，这个径向合力 P_R 将为拉紧螺母通过V形压圈作用于换向片鸽尾上的 P_n 的分力所平衡。由图

11-11 的几何关系可得

$$P_n=\frac{P_R}{2\cos\alpha}\quad(\text{公斤})\tag{11-37}$$

$$P_s=\frac{P_R}{2}\operatorname{tg}\alpha\quad(\text{公斤})\tag{11-38}$$

在换向器装配时，应使 P_s 达到上式的数值。

对于塑料换向器，因 $\alpha=0°$，所以

$$P_n=\frac{1}{2}P_R\quad(\text{公斤})\tag{11-39}$$

二、拱式换向器的应力计算

1．换向器鸽尾处的弯曲应力

通过压圈作用于鸽尾上的力 P_n 将使换向片发生变形，为使换向片能正常工作，应使 P_n 的径向分力 $\frac{P_R}{2}$ 在 A 点(见图 11-12)所产生的弯曲应力不超过材料的许用应力值。

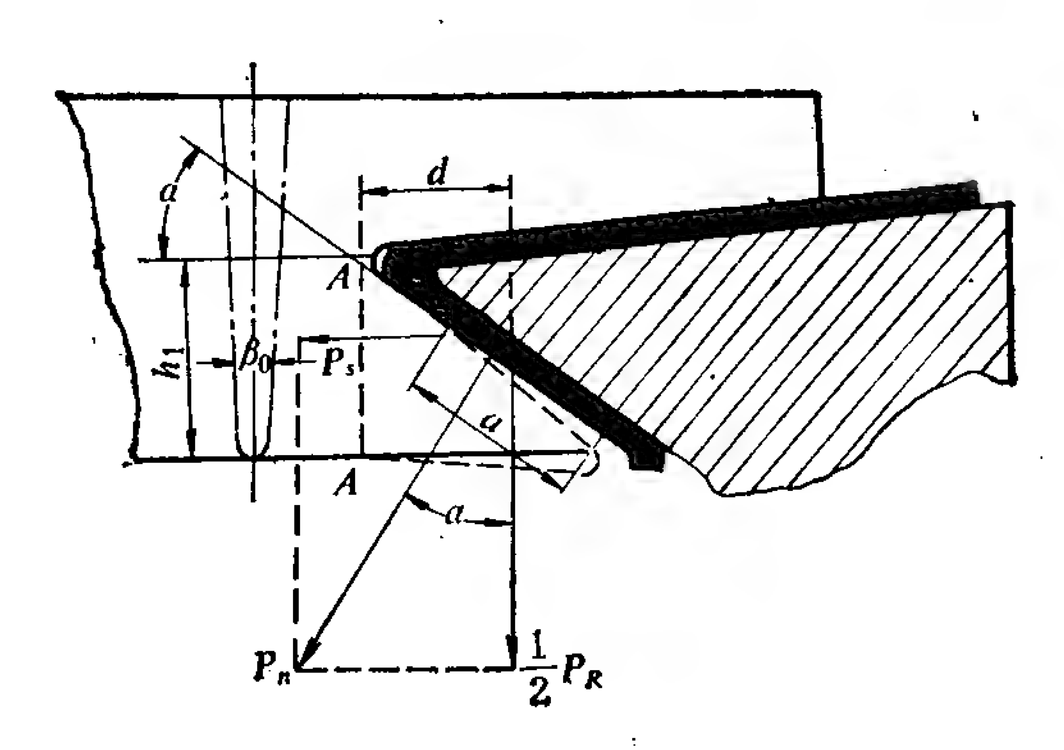


图 11-12　使换向片鸽尾弯曲的作用力分析

根据工程力学，图 11-12 上 A 点的弯曲应力 σ_q 可按悬臂梁的公式计算，即

$$\sigma_q=\frac{P_R d}{2}\frac{1}{\frac{1}{6}\beta_0 h_1^2}=3\frac{P_R d}{\beta_0 h_1^2}\leqslant[\sigma_q]\quad(公斤/厘米^2)\tag{11-40}$$

式中　d——假定 P_R 作用于压圈支撑面的中心时 $\frac{P_R}{2}$ 的力臂(厘米);

$\frac{1}{6}\beta_0 h_1^2$——A–A' 截面的截面模数(近似值);

β_0——换向片截面在 h_1 段的平均厚度(厘米);

$[\sigma_q]$——弯曲许用应力，对于冷拉铜，可取 1800 公斤/厘米^2。

2．云母环上的挤压应力

由图 11–12 可见，在每片换向片鸽尾上作用的压力为 P_n，与之对应的云母环受压面积为 $a\beta_0$，其中 a 为受压面积的有效长度。由此便得挤压应力

$$\sigma_m=\frac{P_n}{a\beta_0}\leqslant[\sigma_m]\tag{11-41}$$

式中　$[\sigma_m]$——塑料云母板的许用应力，通常可取 400～500 公斤/厘米^2。

关于拱式换向器的应力计算，除上述以外，还需计算换向片中部截面(磨损后)的弯曲应力、套筒的拉伸应力和压圈的拉伸与弯曲应力等，这些应力的计算比较复杂，但对于一般中小型直流电机，它们的实际值与相应的许用应力值相比，都有足够的裕量，因此，这里不予计算。

三、塑料换向器的应力计算

1．换向片中间段的抗拉应力

由图 11–9 可见，换向片伸出塑料外的作用力可按下式计算

$$P_P = \frac{l_K h_1}{S_K} P_R \quad (公斤) \tag{11-42}$$

若令图 11-9c 点处的换向片厚度为 b_{Kc}，则换向片中间段的抗拉应力为

$$\sigma_{Kc} = \frac{P_P}{l_1 b_{Kc}} \leqslant [\sigma] \quad (公斤/厘米^2) \tag{11-43}$$

式中 $[\sigma]$——拉伸许用应力，对于铜，可取 300(公斤/厘米²)。

2．换向片 U 形槽根部的弯曲应力 σ_{cd}

在换向片 ce 处有作用力 P_n，cd 截面处经受最大的弯曲应力 σ_{cd}，其值可按悬臂梁的公式计算

$$\sigma_{cd} = \frac{P_n\left(\frac{l_2}{2}\right)}{\frac{1}{6}\beta_{0c} h_3^2} = \frac{1.5 P_R l_2}{\beta_{0c} h_3^2} \leqslant [\sigma_q] \quad (公斤/厘米^2) \tag{11-44}$$

式中 $\frac{l_2}{2}$——假定 P_n 作用于 ce 段的中间时 P_n 的力臂(厘米)；

$\frac{1}{6}\beta_{0c} h_3^2$——$cd$ 截面的截面模数(近似值)；

β_{0c}——换向片截面在 cd 段的平均厚度(厘米)。

3．塑料凸缘上的弯曲应力 σ_{ef}。

塑料凸缘 ce 面上有作用力 P_n，ef 截面处经受最大的弯曲应力 σ_{ef}，其计算方法与 σ_{cd} 相似

$$\sigma_{ef} = \frac{1.5 P_R l_2}{\beta_{0e} h_2^2} \leqslant [\sigma_f] \quad (公斤/厘米^2) \tag{11-45}$$

式中 β_{0e}——换向片截面在 ef 段的平均厚度(厘米)；

$[\sigma_f]$——塑料的弯曲许用应力，可取 700(公斤/厘米²)。

例 11-4 一台 Z3-83 直流电机，$P_N = 75$ 千瓦，$U_N = 220$

伏，$n_N=1500$ 转/分，$n_{\max}=3460$ 转/分，换向器的数据是：$D_K=18$ 厘米，$l_K=17.7$ 厘米，$h=3.15$ 厘米，$h_1=1.5$ 厘米，$K=81$，$d=0.8$ 厘米，$\beta_0=0.444$ 厘米，$S_K=46.5$ 厘米^2，$\alpha=30°$。试计算换向器的轴向压力，验算换向片鸽尾处弯曲应力及云母环的挤压应力。

解 换向片每片上的径向推力

$$P_P=2\pi p_K S_K/K=\frac{2\pi\times138\times46.5}{81}=498 \quad (公斤)$$

式中

$$p_K=60+5\times\left(\frac{n_{\max}}{1000}\frac{D_K}{10}\right)^{3/2}$$

$$=60+5\times\left(\frac{3460}{1000}\times\frac{18}{10}\right)^{3/2}=138 \quad (公斤/厘米^2)$$

换向片每片上的离心力

$$P_\omega=0.138\frac{(D_K-h)^2}{K}S_K\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2$$

$$=0.138\times\frac{(18-3.15)^2}{81}\times46.5\times\left(\frac{3460}{1000}\right)^2$$

$$=209 \quad (公斤)$$

换向片每片上的总径向力

$$P_R=P_R+P_\omega=498+209=707 \quad (公斤)$$

换向片鸽尾在 A 点上弯曲应力

$$\sigma_q=\frac{3P_R d}{\beta_0 h_1^2}=\frac{3\times707\times0.8}{0.444\times1.5^2}$$

$$=1698(公斤/厘米^2)<[\sigma_q]=1800 \quad (公斤/厘米^2)$$

云母环 30° 斜面上的挤压应力

$$\sigma_m=\frac{P_n}{a\beta_0}=\frac{408}{1.85\times0.444}$$

$$=496(公斤/厘米^2)<[\sigma_m]=500 \quad (公斤/厘米^2)$$

式中 $$P_n=\frac{P_R}{2\cos\alpha}=\frac{707}{2\cos 30^\circ}=408 \quad (\text{公斤})$$

$$a=\frac{2d}{\cos\alpha}=\frac{2\times 0.8}{\cos 30^\circ}=1.85 \quad (\text{厘米})$$

压紧换向器的轴向力

$$\sum P_s=KP_s=81\times 204=16524 \quad (\text{公斤})$$

式中 $$P_s=\frac{P_R}{2}\operatorname{tg}\alpha=\frac{707}{2}\times\operatorname{tg}30^\circ=204 \quad (\text{公斤})$$

11-6 轴承使用寿命的计算

一、轴伸端轴承

轴伸端轴承最不利的受力情况如图 11-13 所示，其支点反力可按下式计算

$$R_B=\frac{P}{l}(l+d)-(Q_0-G_a)\frac{a}{l} \quad (\text{公斤}) \tag{11-46}$$

式中 Q_0——单边磁拉力(公斤)；

P——皮带拉力(公斤)；

G_a——电枢重量(公斤)。

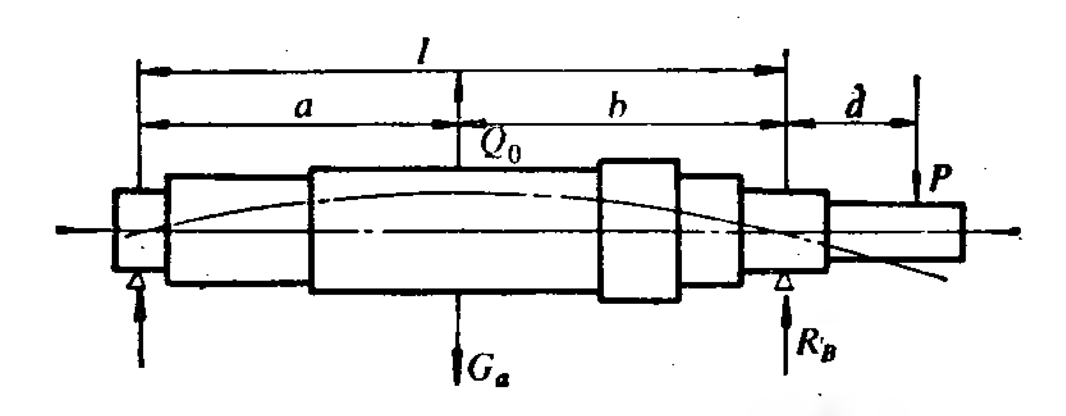


图 11-13 轴伸端轴承的计算

轴承在可以轴向移动时(仅受径向力)的负荷量

$$Q_B=K_\sigma K_T R_B \quad (\text{公斤}) \tag{11-47}$$

式中 K_σ——负载情况系数，通常在可以轴向移动时取 1.5；

K_T——工作温度系数，在温度小于 100℃ 时取 1.0。

在额定功率和额定转速下，轴承使用寿命可由下式计算

$$h_B=\frac{1}{n_N}\left(\frac{C}{Q_B}\right)^{10/3}\text{（小时）}>[10000\text{ 小时}] \quad (11\text{–}48)$$

式中 C——轴承的工作容量系数，Z3 系列电机中所用的轴承规格及其容量系数如表 11–2 所示。

表 11-2 轴承容量系数

电机型号	Z3–1	Z3–2	Z3–3	Z3–4	Z3–5
选用轴承	60302	60303	60305	60307	60308
容量系数	13500	17000	27000	40000	48000
电机型号	Z3–6	Z3–7	Z3–8	Z3–9	Z3–10
选用轴承	309	$\frac{2310}{310}$	$\frac{2312}{312}$	$\frac{2314}{314}$	$\frac{2317}{317}$
容量系数	57000	$\frac{100000}{72000}$	$\frac{158000}{94000}$	$\frac{200000}{120000}$	$\frac{290000}{158000}$

二、非轴伸端轴承

非轴伸端轴承的最不利的受力情况如图 11–14 所示，其支点反力可按下式计算

$$R_A=P\frac{a}{l}+(Q_0+G_a)\frac{b}{l}\quad\text{（公斤）}\qquad(11\text{–}49)$$

轴承对轴固定时(即同时受轴向力和径向力)的载荷量：

$$Q_A=(R_A+mT)K_\sigma K_T\qquad(11\text{–}50)$$

式中 m——径向和轴向寿命计算时的差别系数，通常取为 1.5；

T——轴向载荷，卧式电机取 $T=0.15G_a$，立卧式通用时取 $T=G_a$。

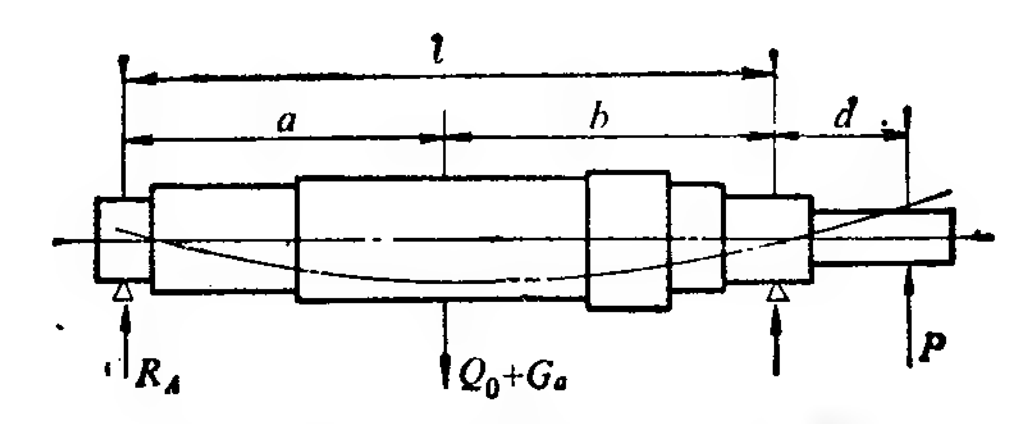


图 11-14　非轴伸端轴承的计算

在额定功率和额定转速下，轴承使用寿命可按下式计算

$$h_A=\frac{1}{n_N}\left(\frac{C}{Q_A}\right)^{10/3}\ (\text{小时})>[10000\ \text{小时}] \quad (11\text{-}51)$$

附录Ⅰ 常用电磁线及裸扁线表

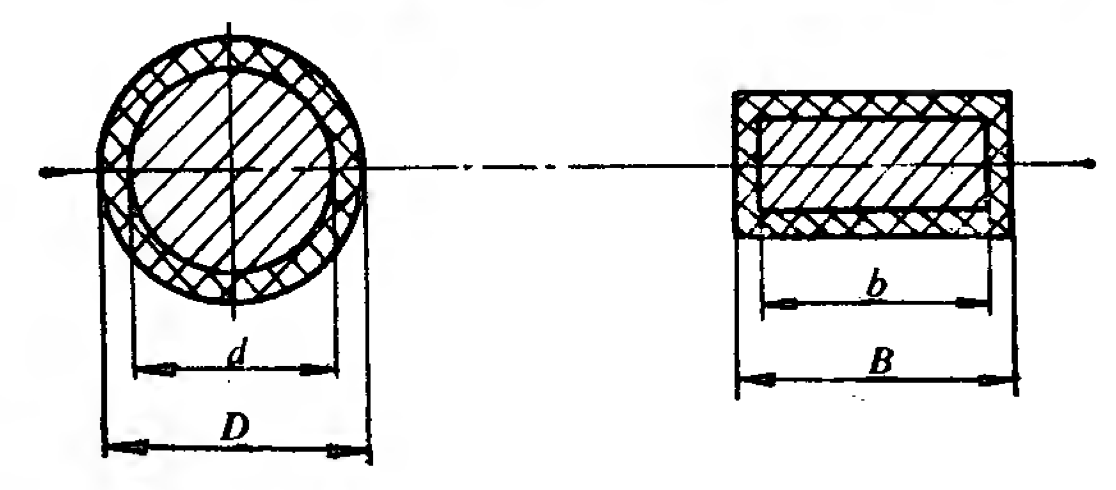
表Ⅰ-1 常用圆铝、铜导线规格表(GB1193-74新标准)

直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)
0.21	0.0346	0.50	0.1964	0.85	0.568	1.45	1.651
0.225	0.0398	0.53	0.221	0.90	0.636	1.50	1.767
0.25	0.0491	0.56	0.246	0.93	0.679	1.56	1.911
0.28	0.0616	0.60	0.283	0.95	0.709	1.60	2.01
0.31	0.0755	0.63	0.312	1.00	0.785	1.70	2.27
0.33	0.0855	0.67	0.353	1.06	0.883	1.80	2.55
0.35	0.0962	0.69	0.374	1.12	0.985	1.90	2.84
0.38	0.1134	0.71	0.396	1.18	1.094	2.00	3.14
0.40	0.1257	0.75	0.442	1.25	1.227	2.12	3.53
0.42	0.1385	0.77	0.466	1.30	1.327	2.24	3.94
0.45	0.1590	0.80	0.503	1.35	1.431	2.36	4.37
0.47	0.1735	0.83	0.541	1.40	1.539	2.50	4.91

表Ⅰ-2 常用圆铝、铜导线规格表

直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)	直径(毫米)	截面积(毫米²)
0.25	0.0491	0.57	0.255	0.96	0.724	1.62	2.06
0.27	0.0573	0.59	0.273	1.00	0.785	1.68	2.22
0.29	0.0661	0.62	0.302	1.04	0.849	1.74	2.38
0.31	0.0755	0.64	0.322	1.08	0.916	1.81	2.57
0.33	0.0855	0.67	0.353	1.12	0.985	1.88	2.78
0.35	0.0962	0.69	0.374	1.16	1.057	1.95	2.99
0.38	0.1134	0.72	0.407	1.20	1.131	2.02	3.20
0.41	0.1320	0.74	0.43	1.25	1.227	2.10	3.46
0.44	0.1521	0.77	0.466	1.30	1.327	2.26	4.01
0.47	0.1735	0.80	0.503	1.35	1.431	2.44	4.68
0.49	0.1886	0.83	0.541	1.40	1.539	2.63	5.43
0.51	0.204	0.86	0.581	1.45	1.651	2.83	6.29
0.53	0.221	0.90	0.636	1.50	1.767	3.05	7.31
0.55	0.238	0.93	0.679	1.56	1.911	3.28	8.45

表 I-3　常用电磁圆线、矩形导线绝缘层两边厚度



QZ 聚酯漆包线直径	0.25～0.33	0.35～0.49	0.51～0.62	0.64～0.72	0.74～0.96	1.00～1.74	1.81～2.02	2.1～2.44
绝缘层厚 $D-d$	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.13

QZ-2 QZL-2 聚酯漆包线直径	0.21～0.225	0.25～0.31	0.33～0.5	0.53～0.71	0.75～0.95	1.0～1.56	1.6～2.5
绝缘层厚 $D-d$	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07

QZ-1 QZL-1 聚酯漆包线直径	0.21	0.225～0.47	0.5～0.69	0.71～0.95	1.0～1.56	1.6～2.5
绝缘层厚 $D-d$	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05

QZSBC 单玻璃丝漆包线直径	0.38～0.69	0.72～0.77	0.80～1.50	1.56～1.62	1.68～1.81
绝缘层厚 $D-d$	0.21	0.22	0.24	0.26	0.27

SBECB 双玻璃丝包矩形线												
	短边 a	0.90～1.95				2.1～2.83	2.1～3.8			4.1～4.4	4.1～5.5	
	长边 b	2.1～2.83	3.05～4.4	4.7～9.3	10	2.1～2.83	3.05～4.4	4.7～9.3	10	4.1～4.4	4.7～9.3	10
绝缘层厚 $B-b$		0.31	0.32	0.34	0.36	0.37	0.38	0.4	0.42	0.45	0.47	0.49

表 I-4　常用 QZB、QZBL 聚酯漆包铜、铝扁线尺寸及绝缘厚度(一)

a	a'	b									
		2.80	3.00	3.15	3.35	3.55	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75
		b'									
		2.96	3.17	3.32	3.52	3.72	3.92	4.17	4.42	4.67	4.93
		S									
1.00	1.14	2.585	2.785	2.935	3.135	3.335	3.535	3.785	4.035	4.285	4.535
1.06	1.20	2.753		3.124		3.548		4.025		4.555	
1.12	1.26	2.921	3.145	3.313	3.537	3.761	3.985	4.265	4.545	4.825	5.105
1.18	1.32	3.089		3.502		3.974		4.505		5.095	
1.25	1.40	3.285	3.535	3.723	3.973	4.223	4.473	4.785	5.098	5.410	5.723
1.32	1.47	3.481		3.943		4.471		5.065		5.725	
1.40	1.55	3.705	3.985	4.195	4.475	4.755	5.035	5.385	5.735	6.085	6.435
1.50	1.65	3.985		4.510		5.110		5.785		6.535	
1.60	1.75	4.265	4.585	4.825	5.145	5.465	5.785	6.185	6.558	6.985	7.385
1.70	1.85	4.397		4.992		5.672		6.437		7.287	
1.80	1.95	4.677	5.038	5.307	5.667	6.027	6.387	6.837	7.287	7.737	8.188
1.90	2.05	4.957		5.622		6.382		7.237		8.187	
2.00	2.16	5.237	5.638	5.937	6.337	6.737	7.137	7.637	8.137	8.637	9.137
2.12	2.28			6.315		7.163		8.117		9.177	

(续)

a	a′	b: 2.80	3.00	3.15	3.35	3.55	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75
		b′: 2.96	3.17	3.32	3.52	3.72	3.92	4.17	4.42	4.67	4.93
		S									
2.24	2.40			6.693	7.141	7.589	8.037	8.597	9.157	9.717	10.28
2.36	2.52					7.829		8.891		10.07	
2.50	2.66					8.326	8.826	9.451	10.08	10.70	11.33
2.65	2.81							10.05		11.38	
2.80	2.96							10.65	11.35	12.05	12.75
3.00	3.17									12.95	
3.15	3.32									13.63	14.41
3.35	3.52										
3.55	3.72										
3.75	3.92										
4.00	4.17										

表中: a'——绝缘线厚度(毫米);　　a——裸线厚度(毫米);

b'——绝缘线宽度(毫米);　　b——裸线宽度(毫米);

S——截面积(毫米^2)。

常用 QZB、QZBL 聚酯漆包铜、铝扁线尺寸及绝缘厚度(二)

a	a′	b												
		5.00	5.30	5.60	6.00	6.30	6.70	7.10	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00
		b′												
		5.19	5.49	5.79	6.19	6.49	6.89	7.30	7.70	8.20	8.70	9.20	9.70	10.20
		S												
1.00	1.15	4.785	5.085	5.385	5.785	6.085								
1.06	1.21	5.085		5.721		6.463								
1.12	1.27	5.385	5.721	6.057	6.505	6.841	7.289	7.737						
1.18	1.33	5.685		6.393		7.219		8.163						
1.25	1.41	6.035	6.410	6.785	7.285	7.660	8.160	8.660	9.160	9.785				
1.32	1.48	6.385		7.177		8.101		9.157		10.35				
1.40	1.56	6.785	7.205	7.625	8.185	8.605	9.165	9.725	10.29	10.99	11.69	12.39		
1.50	1.66	7.285		8.185		9.235		10.44		11.79		13.29		
1.60	1.76	7.785	8.265	8.745	9.385	9.865	10.51	11.15	11.79	12.59	13.39	14.19	14.99	15.79
1.70	1.86	8.137		9.157		10.35		11.71		13.24		14.94		16.64
1.80	1.96	8.637	9.177	9.717	10.44	10.98	11.70	12.42	13.14	14.04	14.94	15.84	16.74	17.64
1.90	2.06	9.137		10.28		11.61		13.13		14.84		16.74		18.64
2.00	2.17	9.637	10.24	10.84	11.64	12.24	13.04	13.84	14.64	15.64	16.64	17.64	18.64	19.64
2.12	2.29	10.24		11.51		12.99		14.69		16.60		18.72		20.84

(续)

a	a′	b												
		5.00	5.30	5.60	6.00	6.30	6.70	7.10	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00
		b′												
		5.19	5.49	5.79	6.19	6.49	6.89	7.30	7.70	8.20	8.70	9.20	9.70	10.20
		S												
2.24	2.41	10.84	11.51	12.18	13.08	13.75	14.65	15.54	16.44	17.56	18.68	19.81	20.93	22.04
2.36	2.53	11.25		12.67		14.32		16.21		18.33		20.69		23.05
2.50	2.67	11.95	12.70	13.45	14.45	15.20	16.20	17.20	18.20	19.45	20.70	21.95	23.20	24.45
2.65	2.82	12.70		14.29		16.15		18.27		20.65		23.30		25.95
2.80	2.97	13.45	14.29	15.13	16.25	17.09	18.21	19.33	20.45	21.85	23.25	24.65	26.05	27.45
3.00	3.18	14.45		16.25		18.35		20.75		23.45		26.45		29.45
3.15	3.33	15.20	16.15	17.09	18.35	19.30	20.56	21.82	23.08	24.65	26.23	27.80	29.38	30.95
3.35	3.53	16.20		18.21		20.56		23.24		26.25		29.60		32.95
3.55	3.73	17.20	18.27	19.33	20.75	21.82	23.24	24.66	26.08	27.85	29.63	31.40	33.18	34.95
3.75	3.93			20.14		22.77		25.77		29.14		32.89		36.64
4.00	4.18			21.54	23.14	24.34	25.94	27.54	29.14	31.14	33.14	35.14	37.14	39.14

表中：a′——绝缘线厚度(毫米)；　a——裸线厚度(毫米)；

b′——绝缘线宽度(毫米)；　b——裸线宽度(毫米)；

S——截面积(毫米²)。

表 I-5 常用铜、铝裸扁线截面尺寸(一)

a	b										
	10.6	11.2	11.8	12.5	13.2	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
	S										
1.40	14.63	15.47									
1.50		16.59									
1.60	16.75	17.71	18.67	19.79							
1.70		18.68		20.89							
1.80	18.72	19.80	20.88	22.14	23.40	24.84					
1.90		20.92		23.39		26.24					
2.00	20.84	22.04	23.24	24.64	26.04	27.64	29.64	31.64			
2.12		23.38		26.14		29.32		33.56			
2.24	23.38	24.73	26.07	27.64	29.21	31.09	33.24	35.48			
2.36		25.88		28.95		32.49		37.21			
2.50	25.95	27.45	28.95	30.70	32.45	34.45	36.95	39.45	41.95	44.45	46.95
2.65		29.13		32.58		36.55		41.85		47.15	
2.80	29.13	30.81	32.49	34.45	36.41	38.65	41.45	44.25	47.05	49.85	52.65
3.00		33.05		36.95		41.45		47.45		53.45	
3.15	32.84	34.73	36.62	38.83	41.03	43.55	46.70	49.85	53.00	56.15	59.30

(续)

a	b										
	10.6	11.2	11.8	12.5	13.2	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
	S										
3.35		36.97		41.33		46.35		53.05		59.75	
3.55	37.08	39.21	41.34	43.83	46.31	49.15	52.70	56.25	59.80	63.35	66.90
3.75		41.14		46.02		51.64		59.14		66.64	
4.00	41.54	43.94	46.34	49.14	51.94	55.14	59.14	63.14	67.14	71.14	75.14
4.25		46.74		52.27		58.64		67.14		75.64	
4.50	46.84	49.54	52.24	55.39	58.54	62.14	66.62	71.14	75.64	80.14	84.64
4.75		52.34		58.52		65.64		75.14		84.64	
5.00	52.14	55.14	58.14	61.64	65.14	69.14	74.14	79.14	84.14	89.14	94.14
5.30		58.50		65.39		73.34		83.94		94.54	
5.60	58.50	61.86	65.22	69.14	73.06	77.54	83.14	88.74	94.34	99.94	105.54
6.00				74.14		83.14		95.14		107.14	
6.30				77.51	81.92	86.96	93.26	99.56	105.86	112.16	118.46
6.70				82.51		92.56		105.96		119.36	
7.10				87.51	92.48	98.16	105.26	112.36	119.46	126.56	133.66

表中：a——裸线厚度(毫米)　b——裸线宽度(毫米)　S——截面积(毫米^2)

常用铜、铝裸扁线截面尺寸(二)

a	b										
	20.0	21.2	22.4	23.6	25.0	26.5	28.0	30.0	31.5	33.5	35.5
	S										
2.50	49.45	52.45	55.45								
2.65	52.45		58.81								
2.80	55.45	58.81	62.17								
3.00	59.45		66.65		74.45						
3.15	62.45	66.23	70.01	73.79	78.20	82.93					
3.35	66.45		74.49		83.20		93.25				
3.55	69.45	74.71	78.97	83.23	88.20	93.53	98.85	105.95			
3.75	74.14		83.14		92.89		104.14		117.27		132.27
4.00	79.14	83.94	88.74	93.54	99.14	105.14	111.64	119.14	125.14	133.14	141.14
4.25	84.14		94.34		105.39		118.14		133.02		150.02
4.50	89.14	94.54	99.94	105.34	111.64	118.39	125.14	134.14	140.89	149.89	158.89
4.75	94.14		105.54		117.89		132.14		148.77		167.77
5.00	99.14	105.14	111.14	117.14	124.14	131.64	139.14	149.14	156.64		
5.30	105.14		117.86		131.64		147.54		166.09		

（续）

a	b										
	20.0	21.2	22.4	23.6	25.0	26.5	28.0	30.0	31.5	33.5	35.5
	S										
5.60	111.14	117.86	124.58	131.30	139.14	147.54	155.94	167.14	175.54		
6.00	119.14		133.54		149.14		167.14				
6.30	124.76	132.32	139.88	147.44	156.26						
6.70	132.76		148.84		166.26						
7.10	140.76	149.29	157.80	166.32	176.26						

表中：a——裸线厚度（毫米）　b——裸线宽度（毫米）　S——截面积（毫米^2）

附录 II　电工用钢磁化曲线表

表 II-1　D23 热轧电工钢片磁化曲线表

B（高斯）	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0						0.43	0.49	0.53	0.56	0.59
1000	0.62	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.79
2000	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.91
3000	0.92	0.94	0.95	0.97	0.98	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05
4000	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22	1.24
5000	1.26	1.27	1.31	1.33	1.36	1.39	1.42	1.45	1.48	1.51
6000	1.54	1.57	1.60	1.63	1.66	1.70	1.73	1.77	1.81	1.85
7000	1.88	1.93	1.97	2.01	2.05	2.09	2.13	2.17	2.21	2.26
8000	2.31	2.37	2.43	2.49	2.55	2.61	2.67	2.73	2.79	2.85
9000	2.91	2.98	3.05	3.12	3.19	3.26	3.33	3.40	3.47	3.54
10000	3.62	3.70	3.79	3.83	3.93	4.08	4.18	4.28	4.38	4.49
11000	4.61	4.74	4.87	5.00	5.14	5.28	5.42	5.57	5.73	5.90
12000	6.08	6.25	6.44	6.63	6.83	7.03	7.24	7.46	7.68	7.90
13000	8.14	8.40	8.68	9.00	9.32	9.65	10.0	10.3	10.7	11.1
14000	11.5	11.9	12.3	12.7	13.2	13.7	14.3	15.0	15.7	16.5
15000	17.3	18.2	19.2	20.2	21.3	22.5	23.9	25.5	27.3	29.3
16000	31.5	33.7	36.0	38.5	41.2	44.0	46.9	50.0	53.3	56.7
17000	60.4	64.3	68.4	72.7	77.3	82.0	86.8	91.7	96.9	102
18000	108	114	120	126	132	138	145	152	159	166
19000	174	182	191	200	209	219	229	239	249	261
20000	273	286	301	317	335	355	380	410	445	485
21000	535	590	650	710	770	840	920	1000	1080	1160
22000	1240	1320	1400	1480	1560	1640	1720	1800	1880	1960
23000	2040	2120	2200	2280	2360	2440	2520	2600	2680	2760
24000	2840	2920	3000	3080	3160	3240	3320	3400	3480	3560
25000	3640	3720	3800	3880	3960	4040	4120	4200	4280	4360

表 II-2 DT1 低碳钢片磁化曲线表

B （高斯）	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	0	0.08	0.16	0.23	0.30	0.34	0.38	0.43	0.47	0.51
1000	0.55	0.59	0.63	0.67	0.72	0.76	0.80	0.84	0.89	0.93
2000	0.97	1.01	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26
3000	1.29	1.32	1.36	1.39	1.42	1.45	1.48	1.51	1.54	1.57
4000	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71	1.73	1.76	1.78	1.81	1.84
5000	1.87	1.89	1.92	1.95	1.98	2.00	2.03	2.06	2.09	2.12
6000	2.15	2.18	2.22	2.26	2.30	2.34	2.39	2.44	2.49	2.55
7000	2.61	2.68	2.75	2.82	2.89	2.95	3.02	3.09	3.16	3.24
8000	3.32	3.40	3.48	3.55	3.63	3.71	3.79	3.87	3.95	4.03
9000	4.12	4.21	4.30	4.39	4.48	4.57	4.67	4.76	4.85	4.94
10000	5.03	5.11	5.20	5.29	5.38	5.46	5.55	5.64	5.73	5.82
11000	5.92	6.02	6.12	6.22	6.32	6.42	6.52	6.62	6.72	6.82
12000	6.92	7.02	7.12	7.22	7.32	7.42	7.52	7.62	7.72	7.82
13000	7.92	8.02	8.12	8.22	8.32	8.42	8.52	8.62	8.72	8.82
14000	8.92	9.02	9.12	9.22	9.32	9.42	9.52	9.64	9.8	10.2
15000	10.5	11.0	11.6	12.4	13.2	14.2	15.2	16.4	17.8	19.3
16000	20.9	22.5	24.2	26.4	28.8	31	34	37	40	43
17000	46	49	52	57	62	67	72	77	82	87
18000	92	98	104	111	118	125	132	138	145	152
19000	160	168	177	186	195	203	212	220	229	239
20000	250	260	270	281	292	303	314	326	338	351
21000	365	380	395	410	425	440	455	470	485	500

表 II-3 磁极用钢片磁化曲线表

B （高斯）	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000	1.0									
2000	1.4									
3000	1.8									
4000	2.1									
5000	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.79	2.83	2.87	2.91
6000	2.95	3.0	3.05	3.1	3.15	3.2	3.25	3.3	3.35	3.4
7000	3.45	3.51	3.57	3.63	3.69	3.75	3.81	3.87	3.93	3.99
8000	4.05	4.12	4.19	4.26	4.33	4.4	4.48	4.56	4.64	4.72
9000	4.8	4.88	4.96	5.04	5.12	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
10000	5.7	5.82	5.95	6.07	6.18	6.3	6.42	6.55	6.67	6.79
11000	6.91	7.03	7.24	7.36	7.48	7.6	7.75	7.91	8.08	8.25
12000	8.42	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.92	10.15	10.45
13000	10.8	11.12	11.45	11.75	12.2	12.6	13.0	13.5	13.93	14.5
14000	14.9	15.35	15.95	16.45	17.05	17.65	18.35	19.2	20.1	21.1
15000	22.4	24.0	25.6	27.2	28.8	30.4	32.0	34.0	36.0	38.0
16000	40.0	42.5	45	47.5	50	52.5	55.8	59.5	63.2	66.9
17000	71.1	75.3	79.5	84	88.5	93.2	98	103	108	114
18000	119	124	130	135	141	148	155	162	170	179
19000	188	197	206	215	225	235	245	256	265	277
20000	290	302	315	328	343	361	380			

表 II-4 铸钢或厚钢板磁化曲线表

B(高斯)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	0	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72
1000	0.8	0.88	0.96	1.04	1.12	1.2	1.28	1.36	1.44	1.52
2000	1.6	1.68	1.76	1.84	1.92	2.00	2.08	2.16	2.24	2.32
3000	2.4	2.48	2.56	2.64	2.72	2.8	2.88	2.96	3.04	3.12
4000	3.2	3.28	3.36	3.44	3.52	3.6	3.68	3.76	3.84	3.92
5000	4.0	4.08	4.17	4.26	4.34	4.43	4.52	4.61	4.7	4.79
6000	4.88	4.97	5.06	5.16	5.25	5.35	5.44	5.54	5.64	5.74
7000	5.84	5.93	6.03	6.13	6.23	6.32	6.42	6.52	6.62	6.72
8000	6.82	6.93	7.03	7.24	7.34	7.45	7.55	7.66	7.76	7.87
9000	7.98	8.10	8.23	8.35	8.48	8.5	8.73	8.85	8.98	9.11
10000	9.24	9.38	9.53	9.69	9.86	10.04	10.22	10.39	10.56	10.73
11000	10.9	11.08	11.27	11.47	11.67	11.87	12.07	12.27	12.48	12.69
12000	12.9	13.15	13.4	13.7	14.0	14.3	14.6	14.9	15.2	15.55
13000	15.9	16.3	16.7	17.2	17.6	18.1	18.6	19.2	19.7	20.3
14000	20.9	21.6	22.3	23.0	23.7	24.5	25.3	26.2	27.1	28
15000	28.9	29.9	31	32.1	33.2	34.3	35.6	37	38.3	39.6
16000	41	42.5	44	45.5	47	48.5	50	51.5	53	55

附录 III 电刷技术性能及工作条件

类别	标号	电阻系数（分接触法）（欧姆·毫米²/米）	压入法硬度（公斤/毫米²）	一对电刷的接触电压降（伏）	摩擦系数不大于	50小时磨损（毫米）不大于	工作条件		
							额定电流密度（安/厘米²）	允许圆周速度（米/秒）	电刷使用单位压力（克/厘米²）
石墨电刷	S3	8～20	10～35	1.5～2.3	0.25	0.2	11	25	200～250
	S6	15～23	3.5～4.3	1.4～3.0	0.28	0.15	12	70	220～400
电化石墨电刷	D104	6～16	3～9	1.6～2.4	0.2	0.25	12	40	150～200
	D308	31～50	22～44	1.9～2.9	0.25	0.15	10	40	200～400
	D214	22～36	17～34	2～3	0.25	0.15	10	40	200～400
	D252	12～22	12～24	2～3.2	0.23	0.15	12	50	200～250
	D172	10～16	5～10	2.4～3.4	0.25	0.2	12	70	150～200
	D374B	45～75	18～35	2.3～3.5	0.25	0.2	12	50	200～400
	D312	40～55	35～50	2.5～3.7	0.25	0.1	12	50	200～400
金属石墨电刷	J201	1～6	12～35	1～2	0.25	0.18	15	25	150～200
	J203	5～12	9～28	1.4～2.2	0.25	0.15	12	20	150～200
	J102	0.1～0.35	6～14	0.3～0.7	0.2	0.4	20	20	180～230
	J204	0.2～1.3	15～36	0.6～1.6	0.2	0.3	15	20	200～250
	J164	0.05～0.15	6～18	0.1～0.3	0.2	0.7	20	20	180～230
	J213	0.2～1	10～28	0.6～1.6	0.2	0.3	15	20	200～250
	J101	<0.25	6～20	<0.4	0.25	0.8	20	20	180～230
	J105	1～12	8～28	<2	0.25	0.5	15	35	150～200

附录IV　Z2系列一般用途小型直流电动机电磁设计数据

（220伏、1500转/分）

（一）

机座号	额定数据				电枢				槽尺寸							机座		
	功率	效率	电流	电压	外径	内径	长度	槽数								外径	内径	长度
	P_N	η	I_N	U_N	D_a	D_{ia}	l_a	Z	b_s	h_s	b_0	h_0	r_1	r_2	h_1	D_j	D_{ij}	l_j
	千瓦	%	安	伏	厘米	厘米	厘米		毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	厘米	厘米	厘米
Z2-11	0.4	68	2.68	220	8.3	2.2	6.9	14		15.5	3.5	0.8	5.3	4.1	5.3	19.2	16	13
Z2-12	0.6	71.5	3.82	220	8.3	2.2	9	14		15.5	3.5	0.8	5.3	4.1	5.3	19.2	16	15
Z2-21	0.8	74	4.92	220	10.6	3.0	6.9	18		17	3.5	0.8	5.22	4	6.98	25	21	13
Z2-22	1.1	77	6.5	220	10.6	3.0	9	18		17	3.5	0.8	5.22	4	6.98	25	21	15.5

Z2-31	1.5	78.5	8.7	220	12	3.0	7.5	18		19.2	3.5	0.8	5.74	4.26	8.4	27.5	23.5	17.5
Z2-32	2.2	81	12.4	220	12	3.0	10.5	18		19.2	3.5	0.8	5.74	4.26	8.4	27.5	23.5	21
Z2-41	3	80	17	220	13.8	4.5	8.5	27		26.7	4	0.8	4.2	1.9	19.8	29.7	26.5	17.5
Z2-42	4	81.5	22.3	220	13.8	4.5	11	27		26.7	4	0.8	4.2	1.9	19.8	29.7	26.5	20.5
Z2-51	5.5	82.5	30.3	220	16.2	5.5	9	31		28	4	0.8	4.19	2.05	20.96	34	30	19
Z2-52	7.5	83	41.1	220	16.2	5.5	13	31		28	4	0.8	4.19	2.05	20.96	34	30	23
Z2-61	10	84.5	53.8	220	19.5	5.5	9.5	31		32	4	0.8	5.17	2.82	23.21	39.5	35.5	20.5
Z2-62	13	85	69.5	220	19.5	5.5	12.5	31		32	4	0.8	5.17	2.82	23.21	39.5	35.5	24
Z2-71	17	86	90.0	220	21	6	12.5	33	7.7	28						42.5	38	25
Z2-72	22	86.5	115.4	220	21	6	16	27	9	28						42.5	38	29
Z2-81	30	87	156.9	220	24.5	7	13.5	31	10.5	28						49.5	44	28
Z2-82	40	87.5	208	220	24.5	7	18	35	8.3	28						49.5	44	32
Z2-91	55	88	284	220	29.4	8	14.5	37	8.9	35						59.5	53	32
Z2-92	75	88.5	385	220	29.4	8	18.5	29	11.4	35						59.5	53	37.5
Z2-101	100	89	511	220	32.7	9.5	19.5	34	10.5	35						65.5	57.5	41
Z2-102	125	89.5	635	220	32.7	9.5	24	38	9.3	35						65.5	57.5	46
Z2-111	160	90	808	220	36.8	11	23	50	8.5	35						72	63	46
Z2-112	200	90	1010	220	36.8	11	28	42	10.5	35						72	63	51

（二）

机座号	主磁极						换向极						换向器		
	极数	极身宽	极身长	极弧系数	气隙	气隙系数	极数	极身宽	极身长	极靴长	气隙	气隙系数	直径	长度	片数
	$2p$	b_m	l_m	α_p	δ	k_δ	$2p_K$	b_{mK}	l_{mK}	l_{pK}	δ_K	$k_{\delta K}$	D_K	l_K	K
		厘米	厘米		毫米			厘米	厘米	厘米	毫米		厘米	厘米	片
Z2-11	2	3.8	6.5	0.64	0.7	1.105	1	2	5	6.5	1.5	1.063	6.2	4.2	56
Z2-12	2	3.8	9	0.64	0.7	1.105	1	2	7.5	9	1.5	1.063	6.2	4.2	56
Z2-21	2	4.8	6.5	0.64	0.8	1.098	1	2	5	6.5	1.5	1.063	8.2	4.5	72
Z2-22	2	4.8	9	0.64	0.8	1.098	1	2	7.5	9	1.5	1.063	8.2	4.5	72
Z2-31	2	5.8	7.5	0.64	1	1.075	1	2.5	5.5	7.5	1.5	1.056	8.2	4.5	72
Z2-32	2	5.8	10.5	0.64	1	1.075	1	2.5	8.5	10.5	1.5	1.056	8.2	4.5	72

Z2-41	4	4.2	8.5	0.63	1	1.124	4	2	6.5	8.5	1.5	1.095	10	3.2	81
Z2-42	4	4.2	11	0.63	1	1.124	4	2	9	11	1.5	1.095	10	3.2	81
Z2-51	4	5.0	9	0.64	1.2	1.109	4	2	6.5	9	1.7	1.084	12.5	3.2	93
Z2-52	4	5.0	13	0.64	1.2	1.109	4	2	10.5	13	1.7	1.084	12.5	4.8	93
Z2-61	4	5.8	9.5	0.65	1.5	1.080	4	2.5	7	9.5	2.5	1.050	12.5	4.8	93
Z2-62	4	5.8	12.5	0.65	1.5	1.080	4	2.5	10	12.5	2.5	1.050	12.5	6.5	93
Z2-71	4	6.8	12.5	0.63	1.5	1.242	4	2.8	9.5	12.5	3	1.150	15	8.5	99
Z2-72	4	6.8	16	0.63	1.5	1.250	4	2.8	13	16	3	1.160	15	8.5	81
Z2-81	4	8.4	13.5	0.64	2	1.278	4	3.2	10.5	13.5	4	1.230	18	11.5	155
Z2-82	4	8.4	18	0.64	2	1.203	4	3.2	15	18	4	1.122	18	11.5	105
Z2-91	4	10.6	14.5	0.64	2.5	1.175	4	4	11.5	14.5	5	1.102	20	15	111
Z2-92	4	10.6	18.5	0.64	2.5	1.210	4	4	15.5	18.5	5	1.127	20	18	87
Z2-101	4	12.8	19.5	0.66	2.5	1.185	4	4.5	16	19.5	5	1.110	23	18.5	136
Z2-102	4	12.8	24	0.66	2.5	1.711	4	4.5	20.5	24	5	1.102	23	18.5	114
Z2-111	4	14.5	23	0.68	3	1.151	4	5.5	19.5	23	6	1.088	25	22.5	100
Z2-112	4	14.5	28	0.68	3	1.190	4	5.5	24.5	28	6	1.111	25	22.5	84

(三)

机座号	换向极绕组			并励绕组			
	每极匝数	导线尺寸 (一)	电阻	每极匝数	导线尺寸 (QZ 漆包铜线)	电阻	励磁电流
	W_K		$R_{K75°C}$	W_f		$R_{f75°C}$	I_f
	匝	毫米	欧姆	匝	毫米	欧姆	安
Z2-11 Z2-12	480 345	ϕ0.96/ϕ1.05 ϕ1.08/ϕ1.19	3.45 2.29	3800 3140	ϕ0.27/ϕ0.32 ϕ0.31/ϕ0.36	892 654	0.183 0.280
Z2-21 Z2-22	352 230	ϕ1.35/ϕ1.46 ϕ1.45/ϕ1.56	1.194 0.773	3700 3000	ϕ0.33/ϕ0.38 ϕ0.41/ϕ0.47	587 370	0.309 0.458
Z2-31 Z2-32	240 174	1.0×2.44/1.27×2.71 1.08×3.28/1.40×3.60	0.604 0.376	3160 2940	ϕ0.38/ϕ0.44 ϕ0.41/ϕ0.47	432 413	0.424 0.414

Z2-41	74	1.0×4.7/1.34×5.04	0.332	1790	φ0.44/φ0.50	337	0.607
Z2-42	58	1.16×4.7/1.5×5.04	0.267	1570	φ0.49/φ0.54	267	0.770
Z2-51	57	1.25×4.7/1.6×5.04	0.1955	1780	φ0.51/φ0.58	271	0.750
Z2-52	38	1.68×4.7/2.03×5.04	0.1275	1390	φ0.62/φ0.69	174	1.176
Z2-61	44	1.68×6.4/2.07×6.75	0.0896	1800	φ0.67/φ0.75	178	1.178
Z2-62	35	2.26×6.4/2.66×6.8	0.0675	1530	φ0.69/φ0.77	172	1.20
Z2-71	30	2.83×8/3.23×8.4	0.0372	1250	φ0.77/φ0.86	109.5	1.83
Z2-72	24	1.95×12.5	0.0323	1160	φ0.74/φ0.83	125.5	1.62
Z2-81	23	2.1×14.5	0.0229	1200	φ0.93/φ1.02	82.8	2.40
Z2-82	16	3.05×14.5	0.0138	1050	φ1.12/φ1.23	59.1	3.40
Z2-91	17	4.4×19.5	0.0071	1120	φ1.12/φ1.23	59.8	3.39
Z2-92	13	5.1×19.5	0.00554	1000	φ1.20/φ1.31	52.5	3.83
Z2-101	10	2~3.28×19.5	0.00349	880	φ1.30/φ1.41	43.5	4.75
Z2-102	8	2~3.8×19.5	0.00284	840	φ1.25/φ1.36	49.9	4.19
Z2-111	7	2~5.1×19.5	0.00188	780	φ1.45/φ1.56	35.7	5.68
Z2-112	6	2~6.5×19.5	0.00147	680	φ1.62/φ1.73	27.8	7.23

(一) 11~22 用 QZ 漆包铜线，31~71 用 SBECB 双玻璃丝包铜线，72~112 用裸扁铜线。

(四)

机座号	串励绕组			电枢绕组						
	每极匝数	导线尺寸	电阻	支路数	每元件匝数	每槽元件数	总导体数	导线尺寸 (二)	电阻	槽满率
	W_s		$R_{s75°C}$	$2a$	W_a	u	N_a		$R_{a75°C}$	k_{sf}
	匝	毫米	欧姆		匝		根	毫米	欧姆	%
Z2-11 Z2-12	72 34		1.123 0.479	2 2	22 16	4 4	2464 1792	ϕ0.53/ϕ0.60 ϕ0.62/ϕ0.69	10.94 6.61	83.5 80.3
Z2-21 Z2-22	40 24		0.345 0.202	2 2	$12^1/_2$ 9	4 4	1800 1296	ϕ0.74/ϕ0.83 ϕ0.86/ϕ0.95	4.80 2.87	79.2 74.8
Z2-31 Z2-32	30 24	(同换	0.203 0.125	2 2	$9^1/_4$ $6^3/_4$	4 4	1336 972	ϕ1.0/ϕ1.1 ϕ1.20/ϕ1.31	2.24 1.27	81.4 82.5

Z2-41 Z2-42	12 6	向极绕组导线尺寸)	0.0692 0.0262	2 2	6 $2^2/_3$	3 3	972 756	ϕ1.25/ϕ1.49 ϕ1.45/ϕ1.69	0.88 0.57	79.3 79.6
Z2-51 Z2-52	8 4		0.0389 0.0180	2 2	4 $2^2/_3$	3 3	744 496	ϕ1.68/ϕ1.95 2~ϕ1.35/2~ϕ1.59	0.419 0.255	82.1 72.9
Z2-61 Z2-62	6 8		0.0169 0.0208	2 2	3 $2^1/_3$	3 3	558 434	2~ϕ1.56/2~ϕ1.82 3~ϕ1.56/3~ϕ1.82	0.210 0.121	68.4 79.6
Z2-71 Z2-72	4 4		0.00799 0.00822	2 2	2 2	3 3	398 324	1.45×4.7/1.80×5.04 1.81×4.7/2.16×5.04	0.113 0.0813	
Z2-81 Z2-82	3 2		0.00515 0.00289	2 2	1 1	5 3	310 210	2~1.25×4.7/2~1.6×5.04 2~1.68×4.7/2~2.03×5.04	0.0586 0.0323	
Z2-91 Z2-92	2 2		0.00153 0.000146	2 2	1 1	3 3	222 174	2~1.81×6.4/2~2.16×6.74 2~2.63×6.4/2~3.03×6.8	0.0242 0.0144	
Z2-101 Z2-102	1.5 1.5		0.000988 0.000930	4 4	1 1	4 3	272 228	2~1.68×6.4/2~2.02×6.74 2~1.95×6.4/2~2.29×6.74	0.00945 0.00740	
Z2-111 Z2-112	1.5 1		0.000722 0.000456	4 4	1 1	2 2	200 168	2~2.63×6.4/2~3.03×6.8 2~3.53×6.4/2~3.93×6.8	0.00517 0.00346	

(二) 11~32 用 QZ 漆包铜线，41~62 用 QZSBC 单玻璃丝漆包铜线，71~112 用 SBECB 双玻璃丝包铜线。

（五）

机座号	电刷		换向参数		转速调整率	效率	电负荷	热负荷	电流密度				
	尺寸	每杆刷数	电抗电动势	换向区占中性区					电枢	换向极	串励	并励	电刷
	$b_b \times l_b$	N_b	e_r		Δn	η	A	AJ_a	J_a	J_K	J_s	J_f	J_b
	毫米²	块	伏	%	%	%	安/厘米		安/毫米²	安/毫米²	安/毫米²	安/毫米²	安/毫米²
Z2-11	10×12.5	2	1.57	58.3	26.4	68.9	118	667	5.65	3.45	3.45	3.35	1.0
Z2-12	10×12.5	2	1.55	58.3	19.7	72.3	121	704	5.83	3.84	3.84	3.71	1.41
Z2-21	10×12.5	2	1.38	44.7	17.3	74.3	124	665	5.35	3.21	3.21	3.61	1.84
Z2-22	10×12.5	2	1.21	44.7	14.0	76.5	117	606	5.18	3.64	3.64	3.44	2.41
Z2-31	10×12.5	2	1.75	44.6	14.3	78.6	146	767	5.25	2.23	2.23	3.74	3.30
Z2-32	10×12.5	2	1.71	44.6	12.0	82.1	148	756	5.09	3.46	3.46	3.59	4.61

Z2-41	10×12.5	1	1.62	77.8	13.3	81.5	183	1217	6.65	3.63	3.63	4.00	6.52
Z2-42	10×12.5	1	1.60	78	10.3	83.3	188	1220	6.51	4.10	4.10	4.09	8.6
Z2-51	10×12.5	1	1.60	67.1	11.1	84.1	216	1433	6.65	5.21	5.21	3.68	11.8
Z2-52	10×12.5	2	1.31	67.1	9.33	85.2	195	1410	6.98	5.14	5.14	3.90	7.94
Z2-61	10×12.5	2	1.60	69	9.40	85.7	240	1655	6.89	4.97	4.97	3.34	10.53
Z2-62	10×12.5	3	1.63	69	12.0	87.5	242	1445	5.97	4.88	4.88	3.40	9.11
Z2-71	12.5×25	2	1.45	64.2	8.0	86.6	264	1755	6.65	3.98	3.98	3.93	7.04
Z2-72	12.5×25	2	1.81	72	9.35	87.8	278	1892	6.82	4.68	4.68	3.77	9.12
Z2-81	12.5×25	3	0.94	65.8	7.53	87.4	311	2120	6.81	5.15	5.15	3.53	8.25
Z2-82	12.5×25	3	1.17	59	6.68	89.4	278	1840	6.55	4.65	4.65	3.45	10.88
Z2-91	16×25	4	1.46	60.7	4.00	89.8	336	2060	6.14	3.32	3.32	3.44	8.75
Z2-92	16×25	5	1.85	69.5	4.66	90.7	358	2085	5.83	3.86	3.86	3.39	9.50
Z2-101	20×32	4	1.89	75.7	2.67	91.1	335	1992	5.96	3.98	3.98	3.58	9.88
Z2-102	20×32	5	2.31	68.6	6.53	91.8	350	2230	6.40	4.26	4.26	3.42	9.80
Z2-111	25×32	5	2.37	64.8	4.40	91.9	347	2135	6.15	4.06	4.06	3.44	10.0
Z2-112	25×32	5	2.82	69.6	2.00	92.6	376	2121	5.68	3.96	3.96	3.51	12.5

（六）

机座号	磁负荷								材料重量			电机总重
	每极磁通	气隙磁密	电枢齿磁密	电枢轭磁密	主磁极磁密	机座磁密	总磁动势	电枢反应去磁安匝	电枢铜重	换向器铜重	定子铜重	
	Φ	B_δ	B_{ta}	B_{ja}	B_m	B_j	$\sum F$	F_{aqd}	G_{Cua}			
	$\times 10^6$ 麦	高斯	高斯	高斯	高斯	高斯	安匝	安匝	公斤	公斤	公斤	公斤
Z2-11	0.291	5350	20260	19690	14230	8030	790	120	0.875	0.8	2.18	30
Z2-12	0.413	5500	20800	15060	14610	9890	900	100	0.988	0.8	2.48	35
Z2-21	0.420	6060	20250	15550	16300	9270	1180	145	1.455	1.4	3.05	50
Z2-22	0.601	6270	20950	16050	16850	11140	1430	90	1.581	1.4	3.73	55
Z2-31	0.578	6390	20000	15230	16100	9500	1360	225	2.26	1.4	3.91	67
Z2-32	0.812	6400	20050	15250	16150	11120	1430	240	2.66	1.4	5.22	79

Z2-41	0.405	6980	18600	12520	14340	8680	1140	143	2.168	1.3	6.51	82
Z2-42	0.528	7025	18730	12620	14450	9660	1212	125	2.547	1.3	7.18	96
Z2-51	0.533	7270	18180	12120	14950	8420	1340	230	3.38	2.4	7.71	144
Z2-52	0.815	7696	19200	12830	15850	10620	1655	140	3.42	3.6	10.1	156
Z2-61	0.721	7630	19750	10480	16500	10530	2150	285	5.0	3.6	13.9	180
Z2-62	0.937	7530	19500	10370	16350	11700	2140	240	6.5	4.8	15.8	200
Z2-71	1.030	7930	19500	12450	15320	11000	2300	340	8.07	5.8	18.6	265
Z2-72	1.262	7590	17990	11900	14650	11600	1967	365	9.16	5.8	19.0	300
Z2-81	1.318	7840	20150	10900	14680	10280	2860	480	12.4	13	25.6	403
Z2-82	1.98	8940	20520	12280	16570	13520	3660	320	12.82	13	36.2	430
Z2-91	1.88	8780	19500	12170	15450	10850	3640	720	20.6	28	47.8	647
Z2-92	2.41	8830	19600	12230	15530	11880	3800	790	25.1	34	54.2	681
Z2-101	3.10	9380	19810	12900	15700	11320	4120	820	27.8	42	59.5	945
Z2-102	3.70	9100	19000	12500	15220	12100	3660	800	29.25	51	62.4	1083
Z2-111	4.24	9375	19850	12800	16030	12300	4640	1002	36	58	78.6	1265
Z2-112	5.06	9200	20150	12580	15750	13250	4770	1100	44.2	58	94.9	1501

附录 V　Z3 系列一般用途小型直流电动机电磁设计数据

(220 伏、1500 转/分)

(一)

机座号	额定数据				电枢				槽尺寸							机座		
	功率	效率	电压	电流	外径	内径	长度	槽数								外径	内径	长度
	P_N	η	U_N	I_N	D_a	D_{ia}	l_a	Z	b_s	h_s	t_0	h_0	h_1	$2r_2$	h_2	D_j	D_{ij}	l_j
	千瓦	%	伏	安	厘米	厘米	厘米		毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	毫米	厘米	厘米	厘米
Z3-11	0.25	61.5	220	1.85	7	2	5.5	14	9.2	12.55	3	0.5	2	6.1	7	16.9	14.5	11
Z3-12	0.37	67	220	2.57	7	2	7.5	14	9.2	12.55	3	0.5	2	6.1	7	16.9	14.5	13.8
Z3-21	0.55	71	220	3.52	8.3	2.2	7	18	8.5	14.13	3	0.5	2	5.36	9	20.2	17	13.1
Z3-22	0.75	73.5	220	4.64	8.3	2.2	9.5	18	8.5	14.13	3	0.5	2	5.36	9	20.2	17	15

Z3-31	1.1	76.5	220	6.54	10.6	3.2	7	18	11.2	15.53	3	0.5	2	8.06	9	25	20.8	13.2
Z3-32	1.5	78.5	220	8.68	10.6	3.2	9.5	18	11.2	15.53	3	0.5	2	8.06	9	25	20.8	17
Z3-33	2.2	81	220	12.6	10.6	3.2	13	18	11.2	15.53	3	0.5	2	8.06	9	25	20.8	19.5
Z3-41	3	80	220	17.0	12	4	9.5	25	8.1	20.55	3	0.5	2	4.1	16	26.8	24	16.8
Z3-42	4	81.5	220	22.3	12	4	12.5	25	8.1	20.55	3	0.5	2	4.1	16	26.8	24	20
Z3-51	5.5	82.5	220	30.3	13.8	4.5	10	27	8.3	22.55	3	0.5	2	4.1	18	31.7	28.5	18.5
Z3-52	7.5	83.5	220	40.8	13.8	4.5	13.5	27	8.3	22.55	3	0.5	2	4.1	18	31.7	28.5	22.3
Z3-61	10	84.5	220	53.8	16.2	5.5	12	31	7.9	25.8	3.5	0.6	2.2	3.6	21.2	36.2	32	25.2
Z3-62	13	85	220	69.5	16.2	5.5	16.5	31	7.9	25.8	3.5	0.6	2.2	3.6	21.2	36.2	32	29
Z3-71	17	86	220	89.8	19.5	6.0	12.5	31	6.3	24						42.5	37.5	27.5
Z3-72	22	86.5	220	115.7	19.5	6.0	16.5	29	7.1	24						42.5	37.5	30
Z3-73	30	87	220	156.6	19.5	6.0	23.5	35	6.3	24						42.5	37.5	34.5
Z3-81	40	87.5	220	208	24.5	7.5	12.5	29	9.2	30						53.1	47	32
Z3-82	55	88	220	284	24.5	7.5	18	35	8.3	30						53.1	47	37.1
Z3-83	75	88.5	220	386	24.5	7.5	25	27	10.7	30						53.1	47	40.9
Z3-91	100	89.5	220	508	29.4	9.0	19	38	8	32						61.5	53.5	40.9
Z3-92	125	90	220	632	29.4	9.0	25.5	38	7.5	32						61.5	53.5	46
Z3-101	160	90.5	220	805	32.7	10.6	24.6	50	6.6	34						69.6	60	49
Z3-102	200	91	220	1000	32.7	10.6	30	42	7.8	34						69.6	60	55

（二）

机座号	主磁极						换向极						换向器		
	极数	极身宽	极身长	极弧系数	气隙	气隙系数	极数	极身宽	极身长	极靴长	气隙	气隙系数	直径	长度	片数
	$2p$	b_m	l_m	α_p	δ	k_δ	$2p_K$	b_{mK}	l_{mK}	l_{pK}	δ_K	$k_{\delta K}$	D_K	l_K	K
		厘米	厘米		毫米			厘米	厘米	厘米	毫米		厘米	厘米	
Z3-11	2	3	5.5	0.63	0.6	1.08	1	1.5	4.5	5.5	1.2	1.07	6	3.2	56
Z3-12	2	3	7.5	0.63	0.6	1.08	1	1.5	6	7.5	1.2	1.07	6	3.2	56
Z3-21	2	3.8	7	0.63	0.6	1.08	1	1.8	5.5	7	1.2	1.075	6	3.2	72
Z3-22	2	3.8	9.5	0.63	0.6	1.08	1	1.8	7.5	9.5	1.2	1.075	6	3.2	72

Z3-31	2	5.6	7	0.64	0.6	1.061	1	2.2	6	7	1.5	1.05	8.5	5	72
Z3-32	2	5.6	9.5	0.64	0.6	1.061	1	2.2	8.5	9.5	1.5	1.05	8.5	5	72
Z3-33	2	5.6	13	0.64	0.6	1.061	1	2.2	10.5	12	1.5	1.05	8.5	5	72
Z3-41	4	3.5	9.5	0.65	0.7	1.065	4	1.8	7.5	9	2	1.05	10	3.2	75
Z3-42	4	3.5	12.5	0.65	0.7	1.065	4	1.8	10	11.5	2	1.05	10	3.2	75
Z3-51	4	4.3	10	0.65	0.8	1.054	4	2	8	9.5	2	1.045	10	3.2	81
Z3-52	4	4.3	13.5	0.65	0.8	1.054	4	2	11	12.5	2	1.045	10	5	81
Z3-61	4	5.4	12	0.66	0.9	1.07	4	2	10.5	12	2.5	1.05	12.5	6	93
Z3-62	4	5.4	16.5	0.66	0.9	1.07	4	2	15	16.5	2.5	1.05	12.5	6	93
Z3-71	4	6.8	12.5	0.68	1	1.153	4	2.4	11	12.5	3	1.104	15	6	93
Z3-72	4	6.8	16.5	0.68	1	1.177	4	2.4	15	16.5	3	1.121	15	8	145
Z3-73	4	6.8	23.5	0.68	1	1.178	4	2.4	22	23.5	3	1.118	15	10	105
Z3-81	4	9	12.5	0.68	1.4	1.175	4	3.2	11.5	12.5	4	1.12	18	11.5	145
Z3-82	4	9	18	0.68	1.4	1.18	4	3.2	16.5	18	4	1.125	18	14.5	105
Z3-83	4	9	25	0.68	1.4	1.21	4	3.2	23.5	25	4	1.15	18	14.5	81
Z3-91	4	11.2	19	0.68	1.8	1.124	4	3.8	19	17.5	6	1.072	20	18	152
Z3-92	4	11.2	25.5	0.68	1.8	1.11	4	3.8	24	25.5	6	1.065	20	21.5	114
Z3-101	4	13	24.5	0.69	2	1.096	4	4.5	23.5	24.5	8	1.046	23	22	100
Z3-102	4	13	30	0.69	2	1.11	4	4.5	28.5	30	8	1.055	23	25.5	84

（三）

机座号	换向极绕组			并励绕组			
	每极匝数	导线尺寸(一)	电阻	每极匝数	导线尺寸(QZL-1漆包圆铝线)	电阻	励磁电流
	W_K		$R_{K75°C}$	W_f		$R_{f75°C}$	I_f
	匝	毫米	欧姆	匝	毫米	欧姆	安
Z3-11	554	$\phi0.83/\phi0.86$	6.75	3600	$\phi0.33/\phi0.35$	732	0.271
Z3-12	410	$\phi0.96/\phi0.99$	4.11	3660	$\phi0.35/\phi0.37$	790	0.265
Z3-21	352	$\phi1.25/\phi1.29$	2.22	3400	$\phi0.28/\phi0.40$	620	0.335
Z3-22	264	$\phi1.35/\phi1.39$	1.76	2900	$\phi0.41/\phi0.43$	530	0.393
Z3-31	263	$\phi1.74/\phi1.79$	1.06	3650	$\phi0.44/\phi0.46$	592	0.356
Z3-32	215	$\phi1.88/\phi1.93$	0.825	3500	$\phi0.41/\phi0.43$	725	0.297
Z3-33	148	$1.35\times3.28/1.46\times3.39$	0.439	2600	$\phi0.53/\phi0.55$	394	0.512

Z3-41 Z3-42	70 52	1.25×4.1/1.36×4.22 1.68×4.1/1.8×4.22	0.488 0.325	1440 1360	ϕ0.62/ϕ0.65 ϕ0.72/ϕ0.75	217.5 185	0.94 1.15
Z3-51 Z3-52	51 41	1.81×5.1/1.93×5.32 2.1×5.9/2.23×6.03	0.2085 0.154	1300 1100	ϕ0.77/ϕ0.80 ϕ0.83/ϕ0.86	139.7 121.1	1.50 1.66
Z3-61 Z3-62	37 27	2.63×6.4/2.76×6.53 1.45×12.5	0.1055 0.0814	1200 1000	ϕ0.86/ϕ0.89 ϕ0.93/ϕ0.96	122.3 105.9	1.74 1.96
Z3-71 Z3-72 Z3-73	29 22 16	1.81×12.5 2.44×12.5 3.28×12.5	0.0574 0.0407 0.0296	1150 1020 840	ϕ1.04/ϕ1.08 ϕ1.12/ϕ1.16 ϕ1.25/ϕ1.29	88 80.4 67.2	2.23 2.46 3
Z3-81 Z3-82 Z3-83	22 16 12	3.53×18 4.7×18 6×18	0.0181 0.01254 0.00952	1240 1050 940	ϕ1.35/ϕ1.39 ϕ1.45/ϕ1.49 ϕ1.40/ϕ1.44	66.5 58.8 67.1	2.85 3.19 2.8
Z3-91 Z3-92	23 17	2～3.8×18 2～5.1×18	0.00602 0.00416	1000 900	ϕ1.81/ϕ1.86 ϕ1.62/ϕ1.67	41 51.6	4.47 3.78
Z3-101 Z3-102	8 13	2～6×18 2～6.5×18	0.00338 0.00292	770 740	ϕ2.02/ϕ2.07 ϕ2.02/ϕ2.07	29.5 31.6	6.39 6.01

(一) 11～32 用 QZL-1 漆包圆铝线，33～61 用 QZBL 漆包扁铝排，62～102 用裸扁铝排。

（四）

机座号	串励绕组			电枢绕组						
	每极匝数	导线尺寸(裸铜线)	电阻	支路数	每元件匝数	每槽元件数	总导体数	导线尺寸 (QZ或QZB漆包铜线)	电阻	槽满率
	W_s		$R_{s75°C}$	$2a$	W_a	u	N_a		$R_{a75°C}$	k_{sf}
	匝	毫米	欧姆		匝		根	毫米	欧姆	%
Z3-11				2	28	4	3136	$\phi0.41/\phi0.47$	19.2	81.2
Z3-12				2	31	4	2352	$\phi0.47/\phi0.53$	12.4	77.8
Z3-21				2	$14^1/_2$	4	2088	$\phi0.59/\phi0.66$	7.76	77.7
Z3-22				2	11	4	1584	$\phi0.67/\phi0.75$	5.17	76.5

Z3-31				2	11	4	1584	$\phi0.8/\phi0.89$	3.61	74.7
Z3-32				2	9	4	1296	$\phi0.9/\phi0.99$	2.62	75.2
Z3-33				2	$6^1/_4$	4	900	$\phi1.08/\phi1.19$	1.45	75.9
Z3-41				2	$6^1/_3$	3	950	$\phi1.25/\phi1.36$	0.841	80.6
Z3-42				2	$4^2/_3$	3	700	$\phi1.45/\phi1.56$	0.530	79.5
Z3-51				2	$4^1/_3$	3	702	$\phi1.56/\phi1.67$	0.439	73.8
Z3-52				2	$3^1/_3$	3	540	$2\sim\phi1.3/2\sim\phi1.41$	0.282	79.7
Z3-61				2	$2^2/_3$	3	496	$2\sim\phi1.5/2\sim\phi1.61$	0.198	79.7
Z3-62				2	2	3	372	$2\sim\phi1.68/2\sim\phi1.79$	0.139	74.2
Z3-71				2	2	3	372	$2\sim1.45\times4.4/2\sim1.57\times4.53$	0.113	
Z3-72				2	1	5	290	$2\sim1\times4.4/2\sim1.1\times4.53$	0.0732	
Z3-73				2	1	3	210	$2\sim1.45\times4.4/2\sim1.57\times4.53$	0.0433	
Z3-81	2	2.1×18	0.00238	2	1	5	290	$2\sim1.45\times5.5/2\sim1.57\times5.62$	0.0406	
Z3-82	2	2.83×18	0.00214	2	1	3	210	$2\sim2.1\times5.5/2\sim2.23\times5.62$	0.0231	
Z3-83	2	3.8×18	0.001948	2	1	3	162	$4\sim1.45\times5.5/4\sim1.57\times5.62$	0.0149	
Z3-91	1	5.5×18	0.000603	4	1	4	304	$2\sim1.56\times5.9/2\sim1.68\times6.02$	0.0119	
Z3-92	2	5.5×25	0.00106	4	1	3	228	$2\sim1.95\times5.9/2\sim2.07\times6.02$	0.00802	
Z3-101	1	7×25	0.000424	8	1	2	400	$2.26\times6.4/2.39\times6.53$	0.00059	
Z3-102	1	7×25	0.00048	8	1	2	336	$2\sim1.45\times6.4/2\sim1.57\times6.52$	0.00042	

（五）

机座号	电刷 尺寸	电刷 每杆刷数	换向参数 电抗电动势	换向参数 换向区占中性区	转速调整率	效率	电负荷	热负荷	电流密度 电枢	电流密度 换向极	电流密度 串励	电流密度 并励	电流密度 电刷
	$b_b \times l_b$	N_b	e_r		Δn	η	A	AJ_a	J_a	J_K	J_s	J_f	J_b
	毫米	块	伏	%	%	%	安/厘米		安/毫米^2	安/毫米^2	安/毫米^2	安/毫米^2	安/毫米^2
Z3-11	8×16	1	1.46	51.8	20.2	61.7	110	642	5.83	2.87		3.48	1.2
Z3-12	8×16	1	1.54	51.8	18.6	67.8	120	778	6.48	3.18		2.89	1.8
Z3-21	8×16	1	1.37	45.5	14.6	71.1	128	752	5.86	2.61		3.22	2.5
Z3-22	8×16	1	1.35	45.5	12.4	73.8	129	773	6.0	3.18		3.14	3.3

Z3-31	10×12.5	2	1.61	43.9	10.3	76.5	148	918	6.2	2.61		2.44	2.5
Z3-32	10×12.5	2	1.83	43.9	3.74	78.9	162	1055	6.52	2.98		2.30	3.3
Z3-33	10×12.5	2	1.66	43.9	5.73	81.5	162	1061	6.55	2.85		2.52	4.8
Z3-41	10×12.5	1	1.49	86	8.2	80.5	202	1312	6.52	3.26		3.35	6.4
Z3-42	10×12.5	1	1.34	86	7.0	83	195	1245	6.29	3.19		2.93	8.4
Z3-51	10×12.5	1	1.50	82.4	6.9	82.7	234	1770	7.55	3.24		3.38	11.6
Z3-52	10×12.5	2	1.54	82.4	5.5	84.3	243	1785	7.35	3.29		3.36	7.8
Z3-61	12.5×16	2	1.35	78.5	3.35	85.5	255	1885	7.40	3.21		3.00	6.6
Z3-62	12.5×16	2	1.02	78.5	3.06	86.7	248	1900	7.66	3.80		2.89	8.5
Z3-71	12.5×16	2	1.46	77	3.85	86.1	267	1930	7.23	3.93		2.95	11
Z3-72	12.5×16	3	0.83	82.8	5.92	87.6	269	1870	6.95	3.79		2.79	9.4
Z3-73	12.5×16	4	1.12	72	7.68	88.6	264	1674	6.35	3.81		2.45	9.7
Z3-81	16×25	3	1.21	84.8	3.63	88.3	385	2565	6.66	3.25	5.48	1.99	8.5
Z3-82	16×25	4	1.57	74	3.82	89.7	385	2460	6.40	3.37	5.58	1.93	8.8
Z3-83	16×25	4	1.94	85.2	6.13	90.8	402	2495	6.22	3.56	5.62	1.81	11.9
Z3-91	20×32	4	1.90	80.8	0.8	90.7	414	2930	7.06	3.70	5.13	1.74	9.8
Z3-92	20×32	5	2.24	78.1	8.8	91.6	388	2722	7.02	3.45	4.60	1.83	9.8
Z3-101	25×32	5	2.33	70.5	2.63	91.3	388	2780	7.16	2.72	4.58	2.00	9.9
Z3-102	25×32	6	2.82	75.4	3.6	92.2	406	2810	6.92	4.27	5.70	1.88	9.5

（六）

机座号	磁负荷								材料重量			电机总重
	每极磁通	气隙磁密	电枢齿磁密	电枢轭磁密	主磁极磁密	机座磁密	总磁动势	电枢反应去磁安匝	电枢铜重	换向器铜重	定子铜重	
	Φ	B_δ	B_{ta}	B_{ja}	B_m	B_j	$\sum F$	F_{aqd}	G_{Cua}			
	×10⁶麦	高斯	高斯	高斯	高斯	高斯	安匝	安匝	公斤	公斤	公斤	公斤
Z3-11	0.226	5950	18570	16220	16220	9950	900	74	0.58	0.59	0.61	25
Z3-12	0.306	5880	18320	16100	16100	11280	883	87	0.64	0.59	0.78	28
Z3-21	0.356	6190	18700	15800	15900	9750	1020	120	0.86	0.97	0.93	30
Z3-22	0.477	6110	18450	15540	15640	11440	1020	120	1.11	0.97	1.01	35

Z3-31	0.476	6400	19600	15850	14400	9800	1080	220	1.57	1.86	1.62	54
Z3-32	0.585	5770	17700	14400	13050	9370	850	190	1.9	1.86	1.56	62
Z3-33	0.869	6260	19200	15600	14120	12200	1110	220	2.1	1.86	2.25	72
Z3-41	0.414	7120	18050	11500	15150	10400	1232	120	2.18	1.25	2.64	73
Z3-42	0.572	7470	18920	12100	15880	12050	1456	102	2.48	1.25	3.73	81
Z3-51	0.568	8060	19180	12300	16100	11320	1764	184	2.75	1.22	3.91	94
Z3-52	0.745	7830	18630	11920	15610	12320	1643	203	3.58	1.90	4.76	111
Z3-61	0.815	8080	18180	12900	15900	9250	1800	290	4.27	3.84	5.59	164
Z3-62	1.090	7860	17550	12540	15460	10800	1667	290	4.70	3.84	6.20	192
Z3-71	1.091	8380	17410	14010	16200	9500	2140	420	7.52	4.86	7.68	230
Z3-72	1.409	8180	17600	13710	15880	11260	2110	290	8.83	6.14	9.48	265
Z3-73	1.960	8000	18050	13390	15510	13630	2180	350	10.72	7.66	12.5	325
Z3-81	1.417	8650	18950	15650	15880	8720	3163	780	17.2	13.1	17.4	450
Z3-82	1.972	8360	19560	15100	15350	10460	3133	780	20.3	16.5	20.6	540
Z3-83	2.57	7840	18260	14180	14400	12330	2731	650	25.4	19.9	22.4	630
Z3-91	2.75	9230	18900	14100	16320	10100	3975	1000	27.2	33.9	31.7	840
Z3-92	3.68	9200	18100	14030	16300	12000	3854	800	28.9	40.5	29.8	965
Z3-101	4.20	9680	19270	14900	16650	10720	4755	960	33	50.2	38.0	1300
Z3-102	5.02	9450	18760	14540	16380	11400	4440	1000	29	57	30.6	1435

附录VI 中型直流电机电磁设计数据

（一）

电机规格					电枢部分										
型号	功率 P_N	电压 U_N	电流 I_N	转速 n_N	外径 D_a	内径 D_{ia}	长度 l_a	槽形 $b_s \times h_s$	槽数 Z	元件 u	导体 N_a	支路 $2a$	绕组形式	线规
ZF2-111-1B	190	230	826	1500	368	110	230	10.6×37.5	42	3	504	8	单蛙	2.44×7.4
ZF2-112-1	240	230	1043	1500	368	110	290	9.2×37.5	46	2	368	8	单蛙	2～1.45×7.4
ZD2-112-1	125	220	624	750/1500	368	110	290	8.2×37.5	50	3	600	8	单蛙	1.68×7.4
ZF2-121-2B	190	230	825	1000	423	120	240	10.1×37.5	46	3	552	8	单蛙	2.26×7.4
ZF2-122-2	240	230	1043	1000	423	120	300	8.8×37.5	54	2	432	8	单蛙	2～1.35×7.4
ZF2-123-2B	300	230	1305	1000	423	120	375	10.1×37.5	42	2	336	8	单蛙	2～1.68×7.4
ZD2-121-1B	100	220	514	500/1200	423	120	240	8.8×37.5	54	4	864	8	单蛙	1.35×7.4
ZD2-122-1B	100	220	516	400/1200	423	120	300	8.8×37.5	54	4	864	8	单蛙	1.35×7.4
ZD2-123-2B	160	220	800	500/1200	423	120	375	9.7×37.5	46	3	552	8	单蛙	2.1×7.4
ZF2-131-2B	370	460	805	1000	493	138	320	9.7×37.5	54	3	648	8	单蛙	2.1×7.4
ZF2-132-2B	470	660	712	1000	493	138	400	12.1×37.5	50	4	800	8	单蛙	2.1×7.4
ZD2-131-2B	160	220	805	400/1200	493	138	320	9.7×37.5	54	3	648	8	单蛙	2.1×7.4
ZD2-132-2B	250	220	1240	500/1200	493	138	400	9.7×37.5	54	2	432	8	单蛙	2～1.56×7.4
ZF2-151-1B	580	460	1260	1000	650	182	290	10.6×37.5	69	3	828	12	单蛙	2.44×6.9
ZF2-152-2B	730	330	2210	1000	650	182	365	12.1×37.5	63	2	504	12	单蛙	2～2.1×6.9
ZD2-151-1B	250	220	1260	400/1000	650	182	290	10.6×37.5	69	3	828	12	单蛙	2.44×6.9
ZD2-152-1B	250	220	1270	320/1000	650	182	365	10.6×37.5	69	3	828	12	单蛙	2.44×6.9
ZD2-153-1B	320	440	798	320/1000	650	182	450	8.8×37.5	81	4	1296	12	单蛙	1.35×6.9
ZF2-171-1B	920	660	1394	1000	850	493	290	13.5×37.5	75	3	900	12	单蛙	2～1.56×6.9
ZD2-172-1B	400	330	1340	320/1000	850	493	320	10.1×37.5	87	3	1044	12	单蛙	2.26×6.9
ZD2-173-1B	500	440	1240	320/1000	850	493	390	10.1×37.5	87	3	1044	12	单蛙	2.26×6.9
ZD2-174-1B	1000	660	1610	500/1000	850	493	475	12.7×37.5	75	3	900	12	单蛙	2～1.45×6.9

（二）

型号	电枢部分										主极部分			
	电流密度	电负荷	热负荷	电阻	换向器			换向参数			极数	极弧系数	气隙	气隙系数
								片间平均电压	换间区占中性区	电抗电动势				
	J_a	A	AJ_a	$R_{a75°C}$	D_K	K	l_K	U_{Kav}	b_K/b_n	e_r	$2p$	α_p	δ	k_δ
ZF2-111-1B	5.87	450	2640	0.0063	280	126	6.98	7.3	63.2	2.18	4	0.68	3.5	1.35
ZF2-112-1	6.22	416	2590	0.00423	280	92	9.57	10	62.7	2.68	4	0.68	3.5	1.34
ZD2-112-1	6.35	405	2570	0.01175	280	150	5.87	5.87	57.5	1.41	4	0.68	3.5	1.318
ZF2-121-2B	6.37	429	2730	0.00825	335	138	7.62	6.67	64	1.672	4	0.678	4	1.282
ZF2-122-2	6.67	425	2840	0.0058	335	108	9.74	8.52	55.4	2.07	4	0.678	4	1.29
ZF2-123-2B	6.65	412	2740	0.00395	335	84	12.5	10.95	61.8	2.5	4	0.678	4	1.28
ZD2-121-1B	6.58	418	2750	0.0214	335	216	4.87	4.08	60.9	1.975	4	0.678	4	1.278
ZD2-122-1B	6.6	420	2770	0.0232	335	216	4.87	4.07	61.2	2.36	4	0.678	4	1.29
ZD2-123-2B	6.67	415	2765	0.0106	335	138	7.62	6.38	63.6	2.82	4	0.678	4	1.278
ZF2-131-2B	6.71	421	2830	0.01228	355	162	6.89	11.35	59	2.4	4	0.688	4.5	1.292
ZF2-132-2B	5.94	460	2730	0.01668	355	200	5.575	13.2	57.5	3.07	4	0.688	4.5	1.335
ZD2-131-2B	6.7	421	2820	0.01229	355	162	6.88	5.43	58.7	2.91	4	0.688	4.5	1.295
ZD2-132-2B	6.86	433	2970	0.00599	355	108	10.33	8.15	54.8	3.73	4	0.688	4.5	1.288
ZF2-151-1B	6.44	426	2750	0.00606	500	207	7.58	13.3	61.8	3.28	6	0.70	4.5	1.13
ZF2-152-2B	6.57	454	2980	0.00235	500	126	12.45	15.75	66	3.92	6	0.70	4.5	1.155
ZD2-151-1B	6.45	426	2750	0.00606	500	207	7.58	6.38	61.8	3.25	6	0.70	4.5	1.13
ZD2-152-1B	6.5	430	2790	0.00663	500	207	7.58	6.38	61.8	3.94	6	0.70	4.5	1.13
ZD2-153-1B	7.3	421	3070	0.0204	500	324	4.85	8.15	59	4.93	6	0.70	4.5	1.11
ZF2-171-1B	5.48	392	2150	0.00602	550	225	7.67	17.6	62.4	3.73	6	0.70	5	1.05
ZD2-172-1B	7.4	437	3230	0.01023	550	261	6.62	7.58	58	5	6	0.70	5	1.05
ZD2-173-1B	6.84	405	2770	0.01107	550	261	6.62	10.1	58	5.44	6	0.70	5	1.05
ZD2-174-1B	6.85	452	3090	0.00794	550	225	7.67	17.6	62.4	6.52	6	0.70	5	1.05

（三）

型号	主极部分										换向极部分				
	极身长度	极靴长度	计算长度	补偿槽 槽数	补偿槽 尺寸	每槽导体数	匝数	导体	补偿度	极宽	气隙		气隙系数	长度	宽度
	l_m	l_p	l'_p	Z_{pc}	$b_{pc}\times h_{pc}$	n_{pc}	W_{pc}	N_{pc}	$\chi\%$	b_m	δ_{K1}	δ_{K2}	$k_{\delta K}$	l_{mK}	b_{mK}
ZF2-111-1B	230	214	222	5	17.6×35.8	4	10	20	93.5	150	8	3	1.19	220	36/72
ZF2-112-1	290		290							150	6	1	1.215	280	36/72
ZD2-112-1	290		290							150	6	0.5	1.215	280	36/72
ZF2-121-2B	240	224	232	5	17.6×35.8	4	10	20	85	180	8	2.5	1.168	230	40/80
ZF2-122-2	300		300							180	8	0	1.162	290	40/80
ZF2-123-2B	375	359	367	6	14.6×35.8	2	6	12	84.3	180	8	2	1.16	365	40/80
ZD2-121-1B	240	224	232	6	14.6×35.8	3	9	18	98	180	8	3	1.155	230	40/80
ZD2-122-1B	300	284	292	6	14.6×35.8	3	9	18	98	180	8	3.5	1.162	290	40/80
ZD2-123-2B	375	359	367	5	17.6×35.8	4	10	20	85.5	180	8	3	1.16	365	40/80
ZF2-131-2B	320	304	312	7	13×42.6	4	14	28	100.4	220	9	2.5	1.161	310	45/90
ZF2-132-2B	400	384	392	5	17.4×40.2	6	15	30	87	220	9	5.5	1.155	390	45/90
ZD2-131-2B	320	304	312	7	13×42.6	4	14	28	101	220	9	2.5	1.162	310	45/90
ZD2-132-2B	400	384	392	6	16.2×42.6	3	9	18	96.8	220	9	6.5	1.16	390	45/90
ZF2-151-1B	290	290	290	4	19.2×38.2	2	4	8	99.4	180	10	4.5	1.066	290	42/85
ZF2-152-2B	365	365	365	5	16.2×38.2	2	5	10	102.5	180	10	2	1.08	365	42/85
ZD2-151-1B	290	290	290	4	19.2×38.2	2	4	8	99.4	180	10	1.5	1.066	290	42/85
ZD2-152-1B	365	365	365	4	19.2×38.2	2	4	8	99.6	180	10	3.5	1.066	365	42/85
ZD2-153-1B	450	450	450	6	14.2×38.2	2	6	12	95.2	180	10	4.5	1.055	450	42/85
ZF2-171-1B	320	320	320	4	27×38.2	2	4	8	91.2	240	11	2.5	1.1	320	50/80
ZD2-172-1B	360	360	360	5	21×38.2	2	5	10	98.5	240	11	9	1.075	360	50/80
ZD2-173-1B	440	440	440	5	21×38.2	2	5	10	98.2	240	11	9	1.07	440	50/80
ZD2-174-1B	525	525	525	4	27×38.2	2	4	8	91.5	240	11	4	1.09	525	50/80

(四)

型号	机座部分			电刷部分			换向极线圈				
	外径	内径	长度	尺寸	刷数	电流密度	匝数	线规	接法	电流密度	电阻
	D_j	D_{ij}	l_j	$b_b \times l_b$	N_b	J_b	W_K		a_K	J_K	$R_{K75°C}$
ZF2-111-1B	740	650	420	20×32	6	10.75	9	5.5×22	2	3.44	0.00159
ZF2-112-1	740	650	480	25×32	6	10.9	13	4.4×35	2	3.41	0.0024
ZD2-112-1	740	650	480	20×32	6	8.1	11	5×35	1	3.58	0.0072
ZF2-121-2B	860	740	450	2~12.5×32	6	8.6	10	6×22	2	3.14	0.00171
ZF2-122-2	860	740	510	2~12.5×32	8	8.15	15	5×35	2	3	0.00228
ZF2-123-2B	860	740	585	2~12.5×32	8	10.2	6	2~4.7×22	2	3.18	0.00093
ZD2-121-1B	860	740	450	2~12.5×32	4	8.03	7	2~4.1×22	1	2.88	0.00351
ZD2-122-1B	860	740	510	2~12.5×32	4	8.07	7	2~4.1×22	1	2.9	0.00416
ZD2-123-2B	860	740	585	2~12.5×32	6	8.34	10	5.5×22	2	3.33	0.00264
ZF2-131-2B	990	850	570	2~12.5×32	6	8.4	9	6×22	2	3.07	0.00196
ZF2-132-2B	990	850	650	2~10×32	6	9.3	14	6×22	2	2.71	0.00364
ZD2-131-2B	990	850	570	2~12.5×32	6	8.38	9	6×22	2	3.07	0.00195
ZD2-132-2B	990	850	650	2~12.5×32	8	9.7	7	2~4.1×22	2	3.47	0.001335
ZF2-151-1B	1170	1030	500	2~10×32	8	8.22	3	2~11×22	1	2.61	0.001
ZF2-152-2B	1170	1030	575	2~12.5×32	10	9.2	3	2~11×22	2	2.29	0.000299
ZD2-151-1B	1170	1030	500	2~10×32	8	8.22	3	2~11×22	1	2.61	0.001
ZD2-152-1B	1170	1030	575	2~10×32	8	8.27	3	2~11×22	1	2.64	0.0012
ZD2-153-1B	1170	1030	660	2~10×32	5	8.32	5	2~5.5×22	1	3.32	0.00474
ZF2-171-1B	1460	1300	620	2~12.5×32	8	7.28	3	2~11×22	1	2.89	0.0011
ZD2-172-1B	1460	1300	660	2~12.5×32	6	9.31	4	2~7×28	1	3.44	0.00203
ZD2-173-1B	1460	1300	740	2~12.5×32	6	8.61	4	2~7×28	1	3.18	0.00228
ZD2-174-1B	1460	1300	825	2~12.5×32	8	8.38	3	2~11×22	1	3.34	0.00164

（五）

型号	补偿线圈				主极线圈							
	线规	电流密度	电阻	接法	匝数	线规	电流密度	电压	接法	电阻	电流	余量
		J_{pc}	$R_{pc\ 75°C}$	a_{pc}	W_f		J_f	U_f	a_f	$R_{f\ 75°C}$	I_f	k_f
ZF2-111-1B	3～3.28×9.3	4.6	0.00283	2	623	1.35×3.05	2	220/110	1/2	21.6/5.4	7.83/15.66	1.133
ZF2-112-1					590	1.68×3.53	1.94	220/110	1/2	15/3.75	11.1/22.2	1.16
ZD2-112-1					573	1.56×4.4	1.89	220/110	1/2	12.65/3.162	12.55/25.1	1.21
ZF2-121-2B	3～3.28×9.3	4.58	0.0031	2	578	1.45×4.1	1.89	220/110	1/2	14.85/3.712	10.82/21.64	1.2
ZF2-122-2					600	1.95×4.1	1.71	220/110	1/2	12.5/3.125	13.3/26.6	1.15
ZF2-123-2B	6～2.63×9.3	4.53	0.00135	2	480	1.68×4.7	1.81	220/110	1/2	11.62/2.905	14.1/28.2	1.16
ZD2-121-1B	3～3.53×9.3	5.3	0.0099	1	613	1.68×4.1	1.755	220/110	1/2	14.14/3.535	11.7/23.4	1.165
ZD2-122-1B	3～3.53×9.3	5.33	0.0109	1	570	1.56×4.7	1.75	220/110	1/2	13.7/3.425	12.4/24.8	1.135
ZD2-123-2B	3～3.28×9.3	4.45	0.00375	2	503	1.95×4.7	1.67	220/110	1/2	11/2.75	14.95/29.9	1.16
ZF2-131-2B	4～2.26×8.6	5.32	0.00586	2	503	1.68×5.1	1.77	220/110	1/2	10.98/2.745	14.8/29.6	1.19
ZF2-132-2B	3～2.1×10.8	5.35	0.00811	2	442	1.81×5.1	1.785	220/110	1/2	9.94/2.485	16.1/32.2	1.21
ZD2-131-2B	4～2.26×8.6	5.32	0.00587	2	550	2.1×4.7	1.67	220/110	1/2	11.14/2.785	15.65/31.3	1.107
ZD2-132-2B	8～1.95×8.6	4.67	0.00265	2	471	2.1×5.1	1.72	220/110	1/2	9.7/2.425	17.5/35	1.135
ZF2-151-1B	8×30	5.27	0.004035	1	360	1.45×5.9	2.02	220/110	1/2	9.78/2.445	16.9/33.8	1.16
ZF2-152-2B	6.5×30	5.68	0.00176	2	360	1.45×5.9	1.83	220/110	1/2	11.15/2.787	15.28/30.56	1.13
ZD2-151-1B	8×30	5.27	0.004035	1	363	1.45×7.4	1.905	220/110	1/2	8.12/2.03	20/40	1.18
ZD2-152-1B	8×30	5.32	0.00443	1	334	1.68×6.9	1.81	220/110	1/2	7.78/1.945	20.7/41.4	1.195
ZD2-153-1B	5.5×30	4.86	0.01039	1	337	2.26×7.4	1.545	220/110	1/2	6.62/1.655	25/50	1.16
ZF2-171-1B	11×30	4.24	0.0036	1	336	1.25×7.4	1.885	220/110	1/2	9.87/2.467	17.03/34.06	1.147
ZD2-172-1B	8×30	5.6	0.00609	1	300	1.45×7.4	1.99	220/110	1/2	8.06/2.015	20.9/41.8	1.143
ZD2-173-1B	8×30	5.18	0.00652	1	276	2.44×7.4	1.874	220/110	1/2	5.2/1.3	32.8/65.6	1.133
ZD2-174-1B	11×30	4.9	0.00425	1	252	2.44×7.4	1.885	220/110	1/2	5.23/1.307	33/66	1.115

（六）

型号	效率	GD^2	磁			负			载			电枢绕组节距			
	$\eta\%$	$kg \cdot m^2$	$\Phi \times 10^6$	B_δ	$B_{ta\frac{1}{3}}$	B_{ta3}	B_{ja}	B_m	B_{tw}	B_j	$\sum F$	$2F_{a\ qd}$	y_{Kl}	y_{kw}	y_{sl}	y_{sw}
ZF2-111-1B	91.3	22.5	3.85	8450	18250	21400	12000	13300	16100	11400	8862		1	62	10	11
ZF2-112-1	91.8	25.8	5.22	9150	19750	22900	12900	14050		13250	10128	2000	1	45	11	12
ZD2-112-1	91	25.8	5.5	9630	20300	23450	13550	14800		13950	11343	1908	1	74	12	13
ZF2-121-2B	91.5	45.0	5.29	9780	19150	21500	12200	14600	16900	10950	11386		1	68	11	12
ZF2-122-2	92.3	52.7	6.7	9880	20300	23000	12350	14530		12050	12177	2570	1	53	13	14
ZF2-123-2B	93	59.4	8.6	10120	18900	21200	12700	15150	17100	13700	12223		1	41	10	11
ZD2-121-1B	88.9	42.5	5.55	10250	20300	23000	12800	15300	17750	11500	13032		1	107	13	14
ZD2-122-1B	88.2	47.3	6.85	10060	20200	22800	12650	15100	17300	12550	12871		1	107	13	14
ZD2-123-2B	91	56.6	8.85	10400	20000	22550	13050	15600	17650	14100	13698		1	68	11	12
ZF2-131-2B	93.5	86.0	8.85	10300	19200	21200	12400	15000	16600	12450	13519		1	80	13	14
ZF2-132-2B	94.2	99.7	10.23	9500	19800	21850	11480	13870	15000	12600	12946		1	99	12	13
ZD2-131-2B	90	86.0	9.3	10850	20300	22300	13050	15750	17550	13050	15669		1	80	13	14
ZD2-132-2B	91.5	103	11.4	10550	19750	21850	12750	15350	17520	14000	15009		1	53	13	14
ZF2-151-1B	92.8	254	6.92	9630	18300	19600	7560	15900	15350	11060	11036		1	68	11	12
ZF2-152-2B	93	296	8.15	9050	17700	18950	7090	14800	14700	11350	9987		1	41	10	11
ZD2-151-1B	90.8	254	7.38	10250	19600	20920	8060	16850	16300	11780	13216		1	68	11	12
ZD2-152-1B	90.2	286	9.11	10080	19220	20600	7940	16500	1600	12700	12591		1	68	11	12
ZD2-153-1B	91.5	313	11.8	10630	19950	21400	8340	17350	17750	14320	15256		1	107	13	14
ZF2-171-1B	94.2	665	9.05	8770	18500	19500	11900	14010	14600	10200	10397		1	74	12	13
ZD2-172-1B	90.2	697	10.85	9380	18500	19420	12950	15000	15360	11500	11400		1	86	14	15
ZD2-173-1B	91.8	771	14.8	10400	20600	21800	14430	16700	17100	14000	16447		1	86	14	15
ZD2-174-1B	94.2	921	16.95	10030	20450	21400	13600	16000	16700	14400	15120		1	74	12	13